



**TUGAS AKHIR-MK TF 141581**

**RANCANG BANGUN SENSOR ARUS BOLAK-  
BALIK (AC) BERBASIS SERAT OPTIK *SINGLE  
MODE-MULTI MODE-SINGLE MODE (SMS)*  
MENGUNAKAN *FERROFLUID***

**HADRIAN HOGANTARA SAPUTRA  
NRP. 2413100078**

**DosenPembimbing :  
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.  
AgusMuhamadHatta, ST, M.Si, Ph. D**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
FakultasTeknologiIndustri  
InstitutTeknologiSepuluhNopember  
Surabaya  
2017**

**Halaman ini sengaja dikosongkan**



**TUGAS AKHIR-MK TF 141581**

**DESIGN OF ALTERNATING CURRENT(AC)  
SENSOR BASED ON SINGLEMODE-MULTIMODE  
SINGLEMODE(SMS) OPTICAL FIBER STRUCTURE  
USING FERROFLUID**

**HADRIAN HOGANTARA SAPUTRA  
NRP. 2413100078**

**Supervisor :  
Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.  
AgusMuhamadHatta, ST, M.Si, Ph. D**

**Engineering Physics Department  
Faculty of Industrial Technology  
InstitutTeknologiSepuluhNopember  
Surabaya  
2017**

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Hadrian Hogantara Saputra

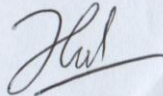
NRP : 2413100078

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul RANCANG BANGUN SENSOR ARUS BOLAK-BALIK (AC) HERBASIS SERAT OPTIK *SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE* (SMS) MENGGUNAKAN FERROFLUID adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan saya ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya

Suarabaya, 2 Agustus 2017  
Yang membuat pernyataan



Hadrian Hogantara Saputra

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

**RANCANG BANGUN SENSOR ARUS BOLAK-BALIK  
(AC) BERBASIS SERAT OPTIK BERSTRUKTUR  
SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS)  
MENGUNAKAN FERROFLUID**

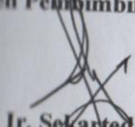
**TUGAS AKHIR**

**Oleh**

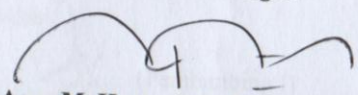
**HADRIAN HOGANTARA SAPUTRA  
NRP 2413 100 078**

**Surabaya, 2 Agustus 2017**

**Menyetujui  
Dosen Pembimbing I**

  
**Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc**  
**NIPN. 19500402197901 1 001**

**Menyetujui  
Dosen Pembimbing II**

  
**Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.**  
**NIPN. 19780902200312 1 002**



**Mengetahui,  
Kepala Departemen  
Teknik Fisika ITS**  
**Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.**  
**NIPN. 19780902200312 1 002**

**Halaman ini sengaja dikosongkan**



**RANCANG BANGUN SENSOR ARUS BOLAK-BALIK  
(AC) BERBASIS SERAT OPTIK SINGLEMODE-  
MULTIMODE-SINGLEMODE (SMS) MENGGUNAKAN  
FERROFLUID**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik  
pada

Bidang Studi Rekayasa Fotonika  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**HADRIAN HOGANTARA SAPUTRA**  
**NRP 2413 100 078**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc. .... (Pembimbing I)
2. Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D ..... (Pembimbing II)
3. Ir. Apriani Kusumawardhani, M.Sc. .... (Ketua Penguji)
4. Dr. rer. nat. Ir. Aulia Nasution, M.Sc. .... (Penguji I)
5. Arief Abdurakhman S.T., M.T. .... (Penguji II)

SURABAYA  
AGUSTUS 2017

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

**RANCANG BANGUN SENSOR ARUS BOLAK-BALIK  
(AC) BERBASIS SERAT OPTIK *SINGLEMODE-  
MULTIMODE-SINGLEMODE*(SMS) MENGGUNAKAN  
FERROFLUID.**

**Nama** : Hadrian Hogantara Saputra  
**Nrp** : 2413100078  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Pembimbing** : 1. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.  
2. Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D

**Abstrak**

Pengukuran arus listrik menjadi aspek penting dalam menjaga kualitas arus listrik. Dengan berkembangnya teknologi perangkat listrik, diperlukan teknologi pengukuran arus listrik baru yang memiliki sensitivitas dan resolusi yang tinggi. Pada tugas akhir ini telah dirancang dan dibuat sensor arus berbasis serat optik SMS dengan ferrofluid untuk pengukuran arus AC. Sensor serat optik ini memanfaatkan perubahan indeks bias dari Ferrofluid. Ferrofluid merupakan cairan yang terdiri dari campuran nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan *surfactant* (asam oleat, asam sitrat, dll). Perubahan indeks bias dari Ferrofluid disebabkan adanya medan magnet yang mempengaruhi Ferrofluid. Pengujian dilakukan dengan mengukur perubahan daya pada serat optik SMS yang telah dibungkus oleh ferrofluid dengan *Optical Power* Meter akibat adanya arus yang mengalir pada kawat penghantar. Rentang arus AC yang digunakan adalah 0-10A. Berdasarkan hasil eksperimen, diperoleh sensitivitas tertinggi sensor arus serat optik SMS sebesar 3.049dB/A. Sensor memiliki tingkat presisi 95% dan resolusi 0.037A.

**Kata kunci** : *Sensor arus listrik, ferrofluid, Serat optik berstruktur SMS*

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

# **DESIGN OF ALTERNATING CURRENT SENSOR BASED ON SINGLEMODE-MULTIMODE-SINGLEMODE OPTICAL FIBER STRUCTURE USING FERROFLUID**

**Name : Hadrian Hogantara Saputra**  
**Nrp : 2413100078**  
**Department :Engineering Physics FTI-ITS**  
**Supervisor : 1. Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc.**  
**2. Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D**

## ***Abstract***

*Electric current measurement become important aspect in electric current quality monitoring. In development of electric trechnologies, electrical system need new current measurment technology with high sensitivity and resolution. In this study, an optical fiber current sensor has been developed using SMS fiber structure and ferrofluid for alternating current measurement. This oprical fiber current sensor works with the change of refractive index of ferrofluid. Ferrofluid is colloidal suspension that was made from  $Fe_3O_4$  nanoparticle and surfactant(oleic acid, citric acid, etc). The refractive index of ferrofluid will change due to the magnetic field that affect ferrofluid.The experiment was done by measuring the change output power of optical fiber current sensor using Optical Power Meter due to current flow in the wire. The alternating current range used in this study is 0-10A. The result is the SMS fiber current sensor has sensitivi of 3.049dB/A in the range 2-7A, precision rate 95% and resolution 0.037A.*

***Keywords : current sensor, ferrofluid, SMS fiber structure***

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Rancang Bangun Sensor Arus Bolak-Balik(AC) Berbasis Serat Optik Berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* menggunakan *ferrofluid*”.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak lepas dari berbagai pihak yang telah membantu, maka pada kesempatan kali ini ijin penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhammad, ST., M.Si., Ph.D. Hatta selaku kepala Departemen Teknik Fisika ITS dan dosen pembimbing yang selalu memberikan ilmu dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sekartedjo, M.Sc. selaku dosen pembimbing dan kepala laboratorium rekayasa fotonika yang selalu memberikan motivasi dan ilmu dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak/Ibu dosen bidang minat rekayasa fotonika yang telah memberikan kritik dan saran dalam pengerjaan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. selaku dosen wali dari penulis yang selalu memberikan motivasi dalam perkuliahan bagi penulis.
5. Orang tua penulis dan segenap keluarga yang senantiasa memberikan motivasi, dukungan dan doa bagi penulis
7. Bapak/Ibu Dosen Teknik Fisika beserta staff yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan
8. Rekan-rekan Tugas Akhir bidang minat Rekayasa Fotonika yang bersama-sama berjuang dalam menyelesaikan tugas akhir.
9. Keluarga Besar Teknik Fisika 2013 yang senantiasa memberikan dorongan dan ilmu bagi penulis.
10. Pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidaklah sempurna dengan adanya beberapa kekurangan. Oleh

karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak. Penulis juga berharap agar laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya bagi penulis.

Surabaya, 2 Agustus 2017

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER .....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK .....	xi
ASBTRACT .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Beakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	5
2.1 Medan Magnet.....	5
2.2 Solenoid .....	6
2.3 Efek Faraday .....	7
2.4 Ferrofluid .....	9
2.5 Serat Optik.....	10
2.6 Serat Optik <i>Multimode Step Index</i> .....	11
2.7 Serat Optik Berstruktur <i>Singlemode-Multimode-Singlemode</i> (SMS).....	14
2.8 Efek Multimode Interference.....	16
2.9 Penggunaan Ferrofluid pada Serat Optik Berstruktur SMS .....	17
2.10 Sensor .....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	23
3.1 Desain Sensor Arus AC berbasis Serat Optik berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid .....	24
3.2 Pembuatan Serat Optik Berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid.....	26

3.2 Penyusunan Eksperimen Pengujian AC dan DC terhadap Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid .....	27
3.3 Pengujian Sensor Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid .....	28
3.4 Analisa Karakteristik Sensor Serat Optik SMS menggunakan <i>Ferrofluid</i> .....	29
3.5 Penarikan Kesimpulan .....	29
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	31
4.1 Hasil Uji Sensor Arus Berbasis Serat Optik SMS menggunakan <i>Ferrofluid</i> pada Arus AC.....	31
4.2 Analisa Karakteristik Statis Sensor Arus AC Serat Optik Berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid .....	35
4.3 Hasil Uji Presisi Sensor Arus AC berbasis Serat Optik Berstruktur SMS menggunakan <i>Ferrofluid</i> .....	38
4.4 Hasil Uji Histerisis Sensor Arus SMS menggunakan <i>Ferrofluid</i> dengan panjang <i>multimode</i> 7.65cm.....	39
4.5 Hasil Uji Pengaruh Arah Medan Magnet terhadap Daya Keluaran Sensor.....	40
BAB V PENUTUP .....	43
5.1 Kesimpulan .....	43
5.2 Saran .....	43
DAFTAR PUSTAKA.....	45
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
BIOGRAFI PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi Penyimpangan Jarum Kompas.....	5
Gambar 2.2	Kaidah Tangan Kanan .....	6
Gambar 2.3	Medan Magnet yang ditimbulkan oleh Solenoid .....	7
Gambar 2.4	Efek Rotasi Faraday .....	8
Gambar 2.5	Transmisi Cahaya pada Medium Tanpa Medan Magnet .....	8
Gambar 2.6	Transmisi Cahaya pada Medium yang Dipengaruhi Medan Magenet .....	9
Gambar 2.7	Ferrofluid Ketika diberikan Medan Magnet .....	9
Gambar 2.8	<i>Core, Cladding</i> Serat Optik .....	10
Gambar 2.9	Bentuk Geometri, Profil Indeks Bias dan Tipe Perambatan Sinar Serat Optik .....	11
Gambar 2.10	Profil Indeks Bias Serat Optik dengan Nilai P yang beragam.....	11
Gambar 2.11	Profil Indeks Bias Serat Optik <i>Singlemode</i> dan <i>Multimode</i> .....	12
Gambar 2.12	Grafik Hubungan Moda dengan Konstanta Propagasi .....	13
Gambar 2.13	Grafik Hubungan Antara Jumlah Moda dengan Kecepatan Grup.....	14
Gambar 2.14	Skema Serat Optik Berstruktur SMS .....	14
Gambar 2.15	Skema Pandu Gelombang <i>Multimode</i> pada Serat Optik SMS.....	16
Gambar 2.16	Profil Medan <i>Self Imaging</i> pada Pandu Gelombang <i>Multimode Step-Index</i> .....	17
Gambar 2.17	Struktur dari Sensor Arus Serat Optik Berstruktur SMS dan <i>Ferrofluid</i> .....	18
Gambar 2.18	Diagram Blok Sistem Pengukuran.....	20
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	24
Gambar 3.2	Prinsip Kerja Sensor Arus AC Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid.....	24

Gambar 3.3	Desain sensor arus AC berbasis serat optik SMS menggunakan Ferrofluid.....	25
Gambar 3.4	Perubahan viskositas Ferrofluid akibat pengaruh medan magnet .....	27
Gambar 3.5	Sensor arus AC serat optik SMS yang telah dibungkus plastik berisi Ferrofluid .....	28
Gambar 3.6	<i>Setup</i> Eksperimen.....	29
Gambar 4.1	Hubungan arus listrik DC terhadap transmisi daya sensor arus serat optik SMS tanpa dan dengan Ferrofluid.....	32
Gambar 4.2	Hubungan arus listrik AC terhadap transmisi daya sensor arus serat optik SMS tanpa dan dengan Ferrofluid .....	33
Gambar 4.3	Hubungan arus listrik DC dan AC terhadap transmisi daya sensor serat optik SMS.....	37
Gambar 4.4	Perbandingan daya keluaran sensor serat optik SMS dengan dan tanpa ferrofluid pada 3 variasi panjang <i>multimode</i> terhadap arus AC .....	40
Gambar 4.5	Hubungan arus AC terhadap daya transmisi sensor arus AC serat optik SMS menggunakan Ferrofluid .....	41
Gambar 4.6	Desain sensor arus AC FBG (a) Perubahan arus dan panjang gelombang terhadap waktu (b).....	41
Gambar 4.7	Histerisis sensor arus serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang mmf 7.65cm.....	41
Gambar 4.8	Uji pengaruh arah medan magnet terhadap daya keluaran sensor arus serat optik SMS menggunakan Ferrofluid dengan panjang mmf 7.65cm.....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Karakteristik Statis Sensor Arus AC Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid dengan 3 variasi Panjang mmf .....	38
Tabel 4.2	Hasil Uji Presisi Sensor Arus AC Serat Optik SMS (lmmf 7.65cm) menggunakan <i>Ferrofluid</i> .....	39

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Arus listrik adalah merupakan salah satu besaran pokok dalam ilmu fisika yang dilambangkan I dan memiliki satuan Ampere. Arus listrik terjadi karena adanya aliran electron dari atom-atom pada sebuah penghantar dengan kecepatan tertentu dan tegak lurus dengan luasan penghantar dimana setiap elektronnya memiliki besaran yang sama (Doucot & Pasquier, 2004). Oersted menemukan bahwa arus listrik yang mengalir menimbulkan medan magnet. Percobaan Oersted menunjukkan ketika jarum kompas yang didekatkan pada kawat yang dialiri arus listrik akan bergerak menyimpang (Martins). Hal ini membuktikan bahwa disekitar kawat penghantar yang dialiri arus listrik akan timbul medan magnet.

Pada tahun 1845 Michael Faraday menemukan bahwa cahaya dapat terpengaruh oleh medan magnet eksternal. Faraday menemukan cahaya yang terpolarisasi linear mengalami perubahan sudut polarisasi ketika sebuah medan magnet yang sangat kuat dikenakan pada cahaya tersebut. Besar perubahan sudut akan bergantung pada bahan yang digunakan untuk merambatkan cahaya tersebut (Hect, 2002).

Arus listrik ada 2 macam, yaitu arus listrik searah (DC) dan arus listrik bolak-balik (AC). Dalam kehidupan sehari-hari maupun di industry listrik sangat dibutuhkan untuk menunjang aktivitas baik menggunakan arus listrik AC maupun DC. Arus bolak-balik (AC) adalah arus listrik yang memiliki nilai positif dan negatif pada satu periode tertentu (Floyd, 2004). terdapat berbagai jenis alat yang telah digunakan untuk mengukur besar arus AC diantaranya *hall effect sensor*, *digital clamp meter*, *current transformer* (CT), dan *Power Quality Analyzer*. Salah satu alat untuk memonitoring arus listrik yaitu CT yang digunakan untuk pengukuran arus dengan besar arus hingga ratusan amper pada

jaringan tegangan tinggi (Suryawan, Sudjadi, & Karnoto, 2007). Dalam pengembangannya, CT memiliki banyak kekurangan antara lain adanya efek histerisis, efek resonansi yang tinggi, alat ukur yang besar dan berat, memiliki akurasi 0,3% [5]. Sedangkan saat ini, telah banyak dikembangkan berbagai macam sensor berbasis optik salah satunya pemanfaatan serat optik sebagai sensor maupun transduser. Penggunaan serat optik sebagai sensor telah banyak dikembangkan karena memiliki beberapa kelebihan diantaranya memiliki sensitivitas yang baik, dapat digunakan pada jarak yang jauh, dan rentan terhadap interferensi gelombang elektromagnetik (Gerd, 1991) (Tonks, 2006).

Baru-baru ini serat optik berstruktur *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) telah banyak dikembangkan. Kelebihan dari sensor serat optik SMS ini adalah dalam hal fabrikasi yang mudah, sensitivitas yang baik, dan dapat diterapkan menggunakan sistem pengukuran berbasis intensitas yang sederhana (Hatta, Rajan, & dkk). Perkembangan serat optik berstruktur *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) banyak digunakan sebagai sensor antara lain pengukuran temperatur menggunakan serat optik berstruktur SMS (Hatta, Rajan, & dkk), serat optik berstruktur SMS sebagai sensor pergeseran (Wang, Rouhui dkk, 2010), serta serat optik berstruktur SMS sebagai sensor level (Yu, Zhao dkk, 2011).

Pada tahun 1980, telah dilakukan penelitian tentang penginderaan arus listrik menggunakan serat optik *multimode* yang dilapisi oleh logam Alumunium. Dari hasil penelitian didapatkan linieritas sensor yang bagus pada rentang arus 5 hingga 2000mA (Makarious & Farrell, 1980). Pada tahun 1999 telah dilakukan penelitian tentang penggunaan sensor serat optik berbasis interferometer sagnac untuk mengukur arus DC dan AC (Minkner & Schmid, 1999). Pada tahun 2005, telah dilakukan penelitian penggunaan material *ferrofluid* sebagai sensor medan magnet dengan memanfaatkan efek Faraday (Chen, Han, & dkk, 2016). Pada tahun 2014, telah dilakukan penelitian tentang sensor arus fiber optik berbasis ferrofluid dan *multimode interference*. Eksperimen dilakukan menggunakan sensor serat optik



berstruktur SMS dengan serat optik *multimode* yang dilapisi oleh *ferrofluid* (Li, Han, & dkk, 2014).

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan mengenai sensor arus listrik menggunakan serat optik yang memanfaatkan *ferrofluid* maka penulis akan melakukan penelitian mengenai rancang bangun sensor arus bolak-balik (AC) berbasis serat optik *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) menggunakan *ferrofluid*. Serat optik *multimode step index coreless* yang dilapisi oleh *ferrofluid* yang akan menjadi sensor arus AC. Penelitian dilakukan dengan cara perhitungan dan pengukuran daya keluaran serat optik SMS karena pengaruh arus listrik bolak-balik (AC).

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, permasalahan yang akan diselesaikan yaitu bagaimana merancang bangun sensor arus bolak-balik (AC) berbasis serat optik berstruktur *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) menggunakan *ferrofluid*.

## 1.3 Tujuan

Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang bangun sensor arus bolak-balik (AC) berbasis serat optik berstruktur *singlemode-multimode-singlemode* (SMS) menggunakan *ferrofluid*.

## 1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

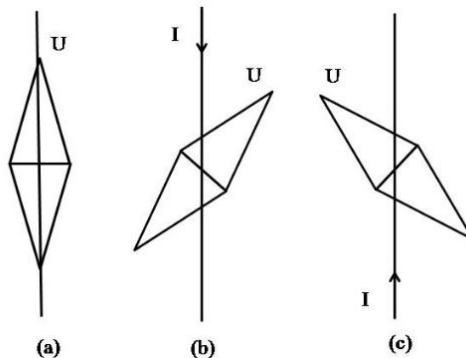
1. Serat optik yang digunakan berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS).
2. *Multimode* yang digunakan adalah jenis *multimode coreless step-index*
3. Arus yang digunakan adalah arus bolak-balik (AC) pada rentang 0-10A
4. Panjang gelombang sumber cahaya yang digunakan adalah 1550nm
5. Ferrofluid yang digunakan adalah campuran antara  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan Asam Oleat

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BAB II TEORI PENUNJANG

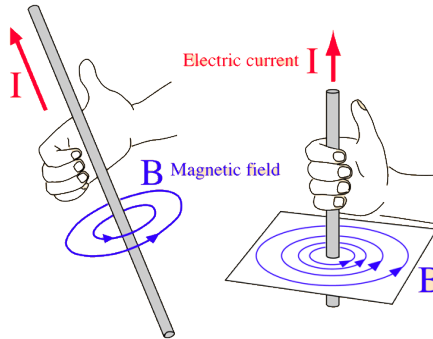
### 2.1 Medan Magnet

Pada tahun 1820, seorang ilmuwan berkebangsaan Denmark, Hans Christian Oersted (1777-1851) mengamati bahwa ketika sebuah kompas diletakkan dekat dengan kawat berarus, maka jarum jam kompas tersebut akan menyimpang atau bergerak ketika arus mengalir melalui kawat. Apabila tidak ada arus yang mengalir melalui kawat, jarum kompas tersebut tetap diam. Karena sebuah jarum kompas hanya dapat disimpangkan oleh medan magnet, maka Oersted menyimpulkan bahwa suatu arus listrik dapat menghasilkan medan magnet.



**Gambar 2.1** Ilustrasi penyimpangan jarum kompas (a) saat tidak ada arus yang mengalir, (b) arus mengalir dari sisi utara ke selatan, (c) arus mengalir dari selatan ke utara (Sidik, 2009)

Gambar 2.1 menunjukkan bahwa arus yang mengalir didalam kawat dapat menghasilkan efek magnetik. Medan magnet yang dihasilkan mempunyai arah. Untuk mengetahui arah medan magnet dapat menggunakan metode kaidah tangan kanan(Sidik, 2009)



**Gambar 2.2** Kaidah tangan kanan (Sidik, 2009)

Gambar 2.2 merupakan metode untuk menentukan arah medan magnet. Ibu jari menunjuk ke arah arus, sedangkan keempat jari yang menggenggam menunjukkan arah medan magnet yang melingkari kawat. Pada kawat lurus, medan magnet disekitar kawat penghantar dinyatakan dengan hukum Bio-Savart bahwa medan magnet  $B$  berbanding lurus dengan arus listrik serta berbanding terbalik dengan jarak benda dari kawat penghantar

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (2.1)$$

Dimana:

$B$  = medan magnet disekitar penghantar (T)

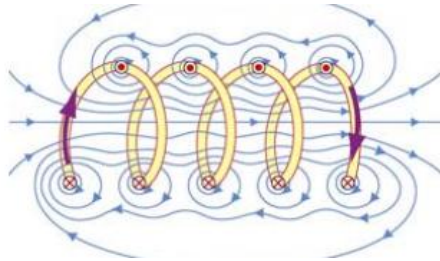
$\mu_0$  = permeabilitas magnet diruang hampa ( $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A} \cdot m$ )

$I$  = arus listrik yang mengalir(A)

$R$  = jarak antara penghantar arus listrik dengan fiber(m)

## 2.2 Solenoid

Solenoid adalah sebuah penghantar listrik panjang yang dililitkan melingkar membentuk seperti selimut tabung. Pada Gambar 2.3 menunjukkan medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoid pada arus  $I$ .



**Gambar 2.3** Medan magnet yang ditimbulkan oleh soilenoid

Dapat dilihat bahwa medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoid, khususnya di dalam solenoid seragam(Doucot & Pasquier, 2004). Besar dari kerapatan medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoid dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l} \quad (2.2)$$

Dimana :

B = Kerapatan Medan Magnet (T)

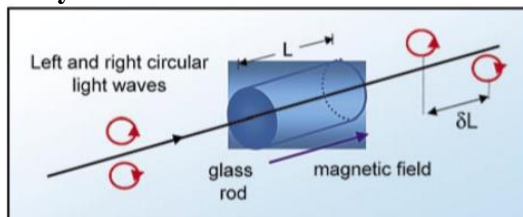
I = Arus (A)

N = Jumlah Lilitan kawat penghantar

l = Panjang Solenoid

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{T.m/A}$ )

## 2.3 Efek Faraday



**Gambar 2.4** Efek rotasi Faraday (ABB,2013)

Fenomena elektromagnetik yang ditunjukkan oleh Michael Faraday pada tahun 1845 mengenai konsep garis gaya

menjelaskan bahwa efek rotasi bidang polarisasi cahaya terjadi akibat adanya interaksi antara cahaya dengan medan magnet disekitarnya, dimana hasil penelitian ini disebut sebagai efek rotasi Faraday.

Gambaran umum mengenai Efek rotasi Faraday adalah fenomena yang terjadi didalam medium transmisi cahaya, dimana gelombang cahaya yang terpolarisasi linier dengan sudut polarisasi tertentu dilewatkan kedalam medium transmisi cahaya yang dipengaruhi oleh medan magnet disekitarnya. Adanya pengaruh medan magnet disekitar medium transmisi cahaya ini menyebabkan gelombang cahaya mengalami sirkulasi kekanan dan kekirri dengan kecepatan putar yang berbeda antara garis gaya pada kuat medan magnet dan kuat medan listrik didalam gelombang cahaya yang berada disepanjang arah propagasi. Dampak yang dihasilkan dari perbedaan kecepatan gelombang adalah terjadinya perbedaan fasa gelombang antara sebelum dan setelah dipengaruhi medan magnet(ABB, 2011).

Adapun rumus matematis mengenai pergeseran fasa gelombang akibat efek rotasi Faraday adalah sebagai berikut.

$$\delta\phi = VBL \quad (2.3)$$

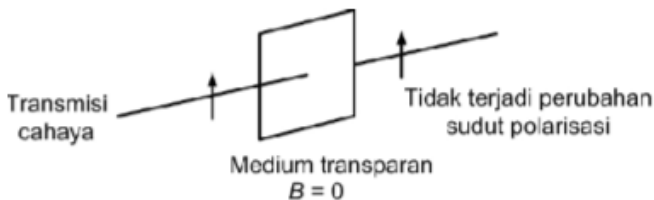
Dimana :

$\delta\phi$  : Besar Pergeseran Fasa Gelombang Cahaya (rad)

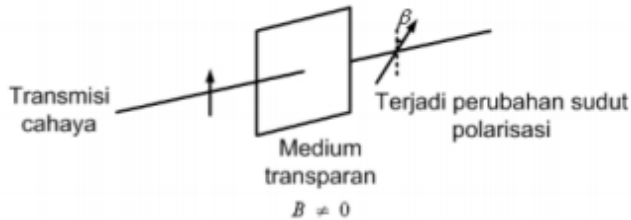
V : Konstanta Verdet (rad/T.m)

L : Panjang batang konduktor arus (meter)

B : Medan Magnet (Tesla)



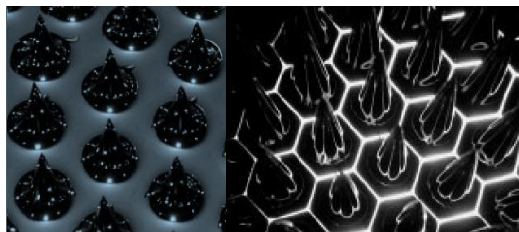
**Gambar 2.5** Transmisi cahaya pada medium tanpa medan magnet.



**Gambar 2.6** Transmisi cahaya pada meduim yang dipengaruhi medan magnet (Respita & dkk, 2007)

## 2.4 Ferrofluid

Cairan koloid magnetik, atau biasa dikenal dengan *ferrofluid*. Adalah suatu cairan koloid yang terdiri dari partikel magnetik yang memiliki diameter kurang lebih 10nm, yang menyatu dalam fluida *carriernya*.. Fluida *carrier* bisa polar maupun non polar. Ferrofluid berbeda dengan *magnetorheologicalfluid* yang biasa digunakan sebagai peredam, rem kendaraan, yang memiliki ukuran partkel dalam skala mikron yang menyatu dalam fluida *carier*. Viskositas dari MRF akan berubah sangat besar ketia dipengaruhi oleh medan magnet dan semakin besar medan magnet, MRF akan berperilaku seperti padatan. Disisi lain, ferrofluid akan tetap cair meskipun dikenai medan magnet yang sangat kuat ( $\sim 10\text{kG}$ )(Scherer & Neto, 2005).



(a)

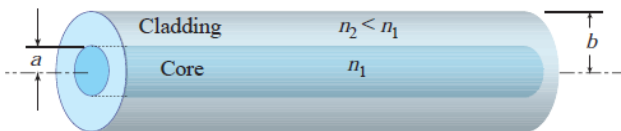
(b)

**Gambar 2.7** Ferrofluid ketika diberikan medan magnet (a) sebesar 200G dan (b) sebesar 330G (Zahn, 2001)

Gerakan daripada ferrofluid saat melalui medan magnet akan berubah sesuai dengan kekuatan medan magnet. Ferrofluid akan bergerak menjauh ketika medan magnet lebih kecil dari medan magnet kritis dari ferrofluid (*backward pumping*), dan akan bergerak searah ketika kuat medan magnet lebih besar dari medan magnet kritis (*forward pumping*). Besar dari medan magnet kritis bergantung pada frekuensi, dan konsentrasi dari partikel magnet yang menyatu dalam fluida. Pada medan magnet AC, viskositas fluida bergantung kepada partikel magnetik yang dipengaruhi oleh *magnetization*  $M$  pada medan magnet  $H$ . Dengan  $M$  yang tidak kolinier dengan  $H$ , maka Torsi kerapatan fluida  $T = \mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{H}$  akan berlaku pada ferrofluid dalam medan magnet yang seragam. Torsi ini akan menyebabkan nanopartikel dari ferrofluid untuk berputar yang menyebabkan pengurangan efektifitas dari perubahan viskositas fluida (Zahn, 2001).

## 2.5 Serat Optik

Serat optik merupakan pemandu gelombang silindris dielektrik yang terbuat dari material *low-loss* seperti plastik maupun gelas silica. Serat optik terdiri dari *core* dimana cahaya dipandu, dan *cladding* sebagai selubung *core*. *Core* memiliki indeks bias lebih tinggi daripada *cladding*.

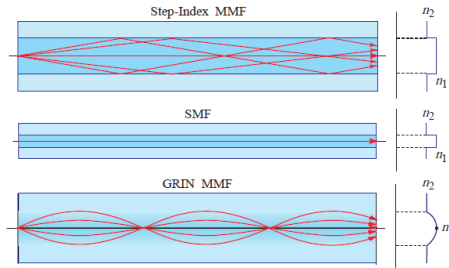


**Gambar 2.8** Core, Cladding serat optik.

Sinar yang masuk pada *boundry core-cladding* dengan sudut yang lebih besar daripada sudut kritis akan mengalami peristiwa *total internal reflection* dan akan dipandu melalui *core* tanpa mengalami pembiasan (Kao, 2009). Berdasarkan moda perambatannya, serat optik dibagi menjadi dua jenis yaitu serat *singlemode* yang memiliki diameter *core* lebih kecil dan serat *multimode* yang memiliki diameter *core* lebih besar. Tipe



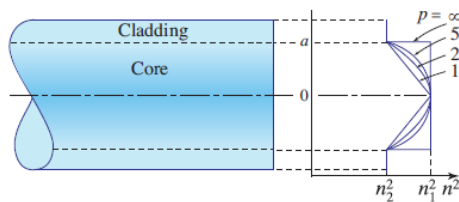
perambatan sinar pada *core* serat optik dibagi dua yaitu *step-index* dan *graded-index*.



**Gambar 2.9** Bentuk Geometri, Profil Indeks Bias dan Tipe Perambatan sinar *step index multimode fiber*, *singlemode fiber*, dan *graded index multimode fiber* (Kao, 2009).

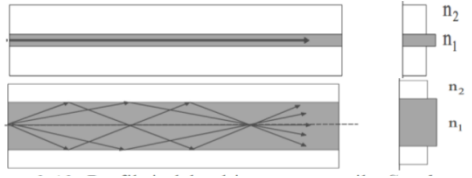
## 2.6 Serat Optik Multimode Step Index

Transmisi cahaya didalam serat optik bergantung pada profil indeks bias serat optik yang dinyatakan dengan simbol  $p$ . Pada serat optik jenis step-index mempunyai nilai profil indeks bias tak terhingga ( $p=\infty$ ), sehingga  $n^2(r)$  merupakan fungsi step yang di dasarkan pada hukum snellius. Hal ini dipengaruhi juga oleh nilai indeks bias *core* yang seragam dan lebih besar dari pada nilai indeks bias *cladding* di dalam serat optik (Wiley, 1991).



**Gambar 2.10** Profil indeks bias serat optik dengan nilai  $p$  yang beragam (Kao, 2009)

Penjalaran moda didalam serat optik dipengaruhi oleh ukuran diameter *core* serat optik (Wiley, 1991).



**Gambar 2.11** Profil Indeks bias serat optik *singlemode* dan *multimode*(Bahtiar, 2008).

Ditinjau dari perbedaan nilai indeks bias antara *core* dan cladding pada serat optik *step-index* adalah sangat kecil, sehingga fraksi perubahan indeks bias ( $\Delta$ ) juga sangat kecil. Rumus matematis fraksi perubahan indeks bias dinyatakan sebagai berikut(Kumar, Varshney, & Sharma, 2003).

$$\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{cladding}^2}{2n_{core}^2} \quad (2.4)$$

Pada peristiwa propagasi gelombang cahaya didalam serat optik *step-index*, akan muncul parameter V atau sering disebut dengan V-number yang merupakan parameter penentu jumlah moda dan konstanta perambatan cahaya didalam serat optik(Wiley, 1991). Rumus matematis parameter V dapat didekati menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$V = \sqrt{(NA)^2 k_0^2 a^2} = 2\pi \frac{a}{\lambda} \cdot NA \quad (2.5)$$

Pada serat optik *singlemode* mempunyai nilai parameter V kurang dari 2,405 ( $V < 2,405$ ), dimana hanya terbentuk moda fundamental  $LP_{01}$  didalam penjalaran cahaya, sehingga semua moda dapat terpandu kedalam inti serat optik(Wiley, 1991). Sedangkan dalam menentukan jumlah moda yang dirambatkan didalam serat optik *step-index*, dapat didekati menggunakan rumus matematis sebagai berikut.

$$M \approx \frac{4}{\pi^2} V^2 \approx \frac{4}{\pi^2} (2n_{core}^2 \Delta) k_0^2 a^2 \quad (2.6)$$

Sedangkan rumus matematis konstanta perambatan cahaya disetiap moda pada serat optik *step-index* dapat didekati menggunakan persamaan matematis berikut.

$$\beta_{l,m} \approx \left[ n_{core}^2 k_0^2 - (l+2m)^2 \frac{\pi^2}{4a^2} \right]^{\frac{1}{2}} \approx n_{core} k_0 \left[ 1 - 2 \frac{(l+2m)^2}{M} \Delta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Dimana :

NA = Numerical apperture

$k_0$  = vektor gelombang pada daerah vakum  $\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (\text{m}^{-1})$

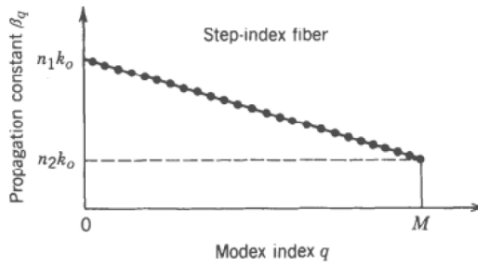
$a$  = jari-jari core serat optik

$M$  = jumlah moda didalam serat optik

$\beta_{l,m}$  = konstanta perambatan cahaya didalam serat optik

$M$  = bilangan integer

Jika ditinjau dari grafik hubungan antar jumlah moda dengan konstanta propagasi penjaralan cahaya didalam serat optik jenis *step-index* adalah seperti pada gambar 2.8 sebagai berikut.



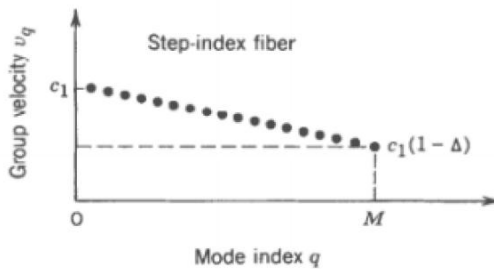
**Gambar 2.12** Grafik hubungan moda dengan konstanta propagasi

Rumus matematis kecepatan group moda didalam serat optik didekati menggunakan rumus matematis berikut ini.

$$v_{l,m} \approx c \left[ 1 + \frac{(l+2m)^2}{M} \Delta \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Dimana  $c$  merupakan kecepatan cahaya diruang hampa  $3 \times 10^8$  m/s.

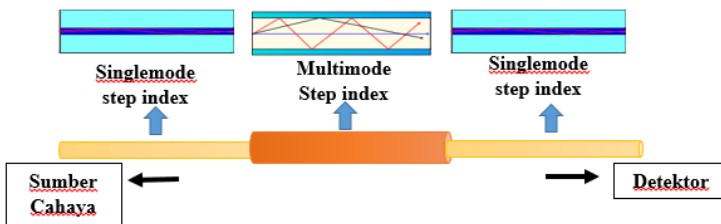
Sedangkan jika ditinjau grafik hubungan antara jumlah moda dengan kecepatan group didalam serat optik jenis *step-index* adalah pada gambar 2.9 sebagai berikut.



**Gambar 2.13** Grafik hubungan antara jumlah moda dengan kecepatan group (Wiley, 1991).

## 2.7 Serat Optik berstruktur *Singlemode-Multimode-Singlemode* (SMS)

Serat optik berstruktur SMS merupakan serat optik yang terdiri dari dua buah serat optik *singlemode* identik yang disambungkan secara aksial pada kedua ujung serat optik *multimode* (Kumar, Varshney, & Sharma, 2003).



**Gambar 2.14** Skema serat optik berstruktur SMS

Sambungan antar serat optik harus tersambung rata secara aksial untuk menghindari adanya eksitasi moda dengan orde lebih tinggi pada daerah sambungan masuk *lead-in* antara *singlemode* dan *multimode* maupun pada sambungan keluar *lead-out* serat *multimode*. Karena diameter *core* serat *multimode* jauh lebih

besar daripada *singlemode*, maka hanya moda-moda *fundamental* dengan order lebih rendah yang dapat dibangkitkan LP01 dan dipandu didalam serat (Hatta A. M., Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures fo Optical Sensing , 2009).

Fenomena pandu gelombang didalam serat optik berstruktur SMS ini dapat dijelaskan melalui modal propagation analysis (MPA). Pada input cahaya multimode ( $z=0$ ) diasumsikan mempunyai distribusi medan  $\psi(r, 0)$  yang sebanding dengan moda fundamental pada singlemode dengan berkas moda dasar yang terpandu adalah LP0m. Sedangkan profil distribusi medan didalam multimode diasumsikan  $\psi_M(r)$  (Kumar, Varshney, & Sharma, 2003). Sehingga rumus matematis profil medan adalah sebagai berikut.

$$\int_0^\infty |\psi(r, 0)|^2 r dr = \int_0^\infty |\psi_M(r)|^2 r dr \quad (2.10)$$

$$\psi(r, 0) = \sum_{m=0}^{m=\infty} A_m \psi_M(r) \quad (2.11)$$

Dimana AM merupakan koefisien eksitasi setiap moda atau disebut dengan amplitudo penjalaran cahaya pada setiap moda yang dapat didekati menggunakan persamaan matematis berikut [23].

$$A_M = \frac{\int_0^\infty \psi(r, 0) \psi_M(r) r dr}{\int_0^\infty \psi_M(r)^2 r dr} \quad (2.12)$$

Sehingga profil distribusi medan gelombang cahaya didalam *multimode* pada jarak tertentu ( $Z = L$ ) adalah sebagai berikut [23].

$$\psi(r, L) = \sum_{m=0}^{m=\infty} A_m \psi_M(r) \exp(-j\beta_m L) \quad (2.13)$$

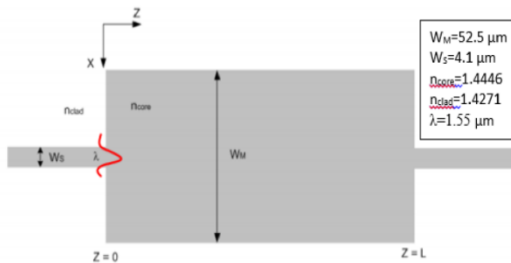
Dimana :

- $\psi(r, L)$  = profil distribusi medan ( $Z = L$ )
- $A_m$  = koefisien eksitasi setiap moda
- $\psi_M(r)$  = profil distribusi medan *multimode*,

$j$	= bilangan imajiner
$\beta_m$	= konstanta propagasi moda ke- $m$
$L$	= panjang serat <i>multimode</i>

## 2.8 Efek Multimode Interference (MMI)

*Multimode Interference* (MMI) merupakan fenomena yang terjadi akibat adanya pemantulan cahaya secara berulang didalam susunan *core* dan *cladding* pandu gelombang (Shodo, 2013). Pemantulan yang berulang didalam *core* menyebabkan terjadinya interferensi internal, sehingga terjadi perubahan pola cahaya yang keluar dari *core* secara periodik. Interferensi yang terjadi dapat secara konstruktif maupun destruktif bergantung pada profil indeks bias, jejari, radius, dan panjang gelombang operasi yang digunakan. Interferensi konstruktif yang terjadi secara periodic ini disebut sebagai *self imaging*. Fenomena *self imaging* didalam pandu gelombang *multimode* dapat dijelaskan menggunakan *modal propagation analysis* (MPA) (Hatta A. M., Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures fo Optical Sensing , 2009).

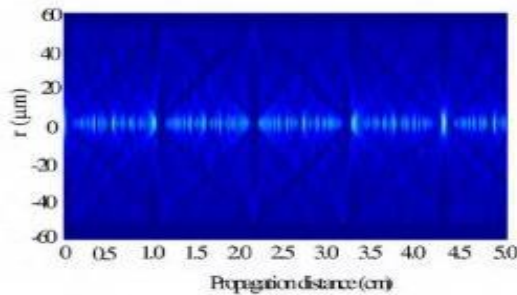


**Gambar 2.15** Skema pandu gelombang multimode pada serat optik SMS (Hatta A. M, 2009).

Pada profil medan *input* ( $z = 0$ ), moda yang berasal dari serat *singlemode* tereksitasi menjadi distribusi moda yang mungkin terpandu kedalam pandu gelombang serat *multimode*. Sedangkan pada profil medan ( $z=L$ ), akan menghasilkan *self imaging* sebanyak  $n$  kali dengan jarak tertentu secara periodik

(jarak *reimaging*) (Hatta A. M., Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures fo Optical Sensing , 2009). Jarak *self imaging* ditentukan oleh konstanta propagasi antar moda yang berdekatan ( $\beta_m$  dan  $\beta_{m+1}$ ), dinyatakan sebagai berikut [25].

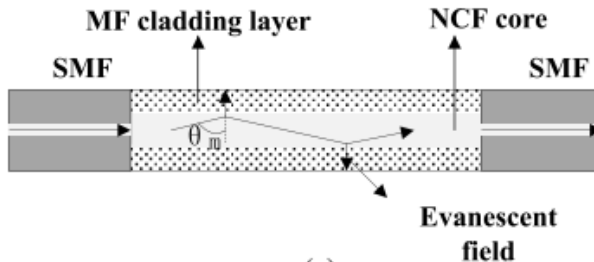
$$L_i = 10 * \frac{\pi}{\beta_m - \beta_{m+1}} \quad (2.14)$$



**Gambar 2.16** Profil medan *self imaging* pada pandu gelombang *multimode step-index*(Hatta A. M., 2009)

## 2.9 Pengaruh Penggunaan *Ferrofluid* pada serat optik berstruktur SMS

Serat optik berstruktur SMS terdiri dari serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode* dimana serat optik *multimode* yang digunakan pada penelitian ini adalah NCF (*no core fiber*). Serat optik *multimode* disambung secara axial pada serat optik *singlemode*. Bagian serat optik *multimode* dimasukkan kedalam tabung kecil yang diisi oleh cairan ferrofluid.



**Gambar 2.17** Struktur dari sensor arus serat optik berstruktur SMS dan ferrofluid (Li, Han, & dkk, 2014)

Berdasarkan prinsip kerja dari SMS, moda fundamental dari serat optik *singlemode* akan dibagi menjadi beberapa moda *liner-polarized*  $\{LP_{nm}\}$  ketika melalui serat optik *multimode*. Dengan asumsi bahwa sambungan antara serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode* tersambung secara sejajar, maka hanya moda simetris yang akan dieksitasi  $\{LP_{0m}\}$ . Jika profil medan dari  $\{LP_{0m}\}$  adalah  $E_m(r)$ , maka profil medan pada serat optik *multimode*  $E(r,0)$  dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E(r, 0) = \sum_{m=1}^N c_m E_m(r), \quad (2.15)$$

Dimana  $r$  adalah posisi radial pada serat optik *multimode*.  $N$  adalah jumlah moda terkesitasi pada serat optik *multimode*, dan  $c_m$  adalah koefisien eksitasi dari moda  $\{LP_{0m}\}$ . Koefisien eksitasi  $c_m$  dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$c_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r, 0) E_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} E_m(r) E_m(r) r dr}. \quad (2.16)$$

Karena ferrofluid yang digunakan pada serat optik *multimode* memiliki nilai absorpsi yang tinggi, medan *evanescent* pada permukaan serat optik *multimode* dan ferrofluid akan menimbulkan atenuasi pada cahaya yang melalui serat optik *multimode* (Wang & G.Farell, 2006). Distribusi dari propagasi cahaya pada serat optik *multimode* pada jarak  $z$  dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E(r, z, \lambda) = \sum_{m=1}^N c_m E_m(r) \exp(-\gamma_m z) \exp(i\beta_m z) \quad (2.17)$$

Dimana  $\gamma_m$  dan  $\beta_m$  adalah koefisien absorpsi *evanescent* dan konstanta propagasi dari  $\{LP_{0m}\}$ . Berdasarkan teori dari medan absorpsi *evanescent* (Ruddy, MacCraith, & Murphy, 1990)



pada serat optik *multimode*, maka  $\gamma_m$  dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\gamma_m = \frac{\alpha_\lambda \lambda n_f \cos \theta_m \cot \theta_m}{4\pi r n_c^2 \cos^2 \theta_c \sqrt{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta_c}} \quad (2.18)$$

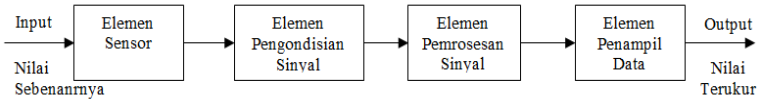
Dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang cahaya pada ruang hampa dan  $\alpha_\lambda$  adalah koefisien atenuasi dari material *cladding* (pada percobaan ini adalah ferrofluid). Cahaya akan dikopel pada serat optik *singlemode* pada ujung dari serat optik *multimode* (Wang & G.Farell, 2006). Transmittansi pada setiap panjang gelombang  $\lambda$  dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$T(\lambda) = 10 \log_{10} \left[ \frac{\left| \int_0^\infty E(r, L, \lambda) E(r, 0) r dr \right|^2}{\int_0^\infty |E(r, L, \lambda)|^2 r dr \int_0^\infty |E(r, 0)|^2 r dr} \right], \quad (2.19)$$

Dimana  $L$  adalah panjang dari serat optik *multimode*. Besar dari koefisien atenuasi  $\alpha_\lambda$  dan indeks bias ferrofluid  $n_f$  akan berubah dengan adanya medan magnet eksternal. Akibat dari perubahan tersebut, koefisien absorpsi  $\gamma_m$ , konstanta propagasi  $\beta_m$  dan nilai transmittansi  $T(\lambda)$  akan berubah (Li, Han, & dkk, 2014). Saat arus listrik melewati kawat solenoid, solenoid akan mengeluarkan medan magnet dimana kuat medan magnet tersebut proporsional terhadap besarnya arus yang lewat. Dengan adanya medan magnet yang mempengaruhi sensor serat optik, nilai transmittansi  $T(\lambda)$  akan berubah dan nilai dari arus yang lewat dapat diukur.

## 2.10 Sensor

Berdasarkan sistem pengukuran, sensor merupakan elemen pertama yang memberikan sinyal keluaran sebagai fungsi dari masukan besaran fisis tertentu (Bentley, 2005). Adapun sistem pengukuran secara umum dibangun dengan empat komponen utama, yaitu sensor, pengondisian sinyal, pemrosesan sinyal, dan display. Berikut ini merupakan diagram blok sistem pengukuran secara umum.



**Gambar 2.18** Diagram blok sistem pengukuran

Sensor memiliki beberapa karakteristik statik yang dijadikan sebagai tolok ukur performansi di dalam sistem pengukuran, diantaranya adalah sebagai berikut (Bentley, 2005).

a. *Range*

*Range* input dari sensor adalah nilai minimum ke maksimum (IMIN ke IMAX) dan *range* output dari element adalah nilai minimum ke maksimum (OMIN ke OMAX) (Bentley, 2005). Thermocouple mungkin memiliki range input dari 100°C ke 250°C.

b. *Span*

*Span* adalah variasi maksimum pada nilai input atau output sensor, *span* input adalah nilai input maksimum dikurangi nilai input minimum (IMAX - IMIN) dan *span* output adalah nilai output maksimum dikurangi nilai output minimum (OMAX - OMIN) (Bentley, 2005). Misalkan transduser tekanan memiliki span input 10<sup>4</sup> Pa dan span output 16 mA.

c. *Linearitas*

Linearitas adalah hubungan antara nilai I dan O sensor yang ideal, jika digambarkan dalam grafik akan membentuk garis lurus (Bentley, 2005). Berikut ini merupakan rumus matematisnya.

$$O - O_{MIN} = \left[ \frac{O_{MAX} - O_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \right] (I - I_{MIN}) \quad (2.20)$$

d. *Non-Linearitas*

Hubungan antara nilai input dan output tidak dalam garis lurus (Bentley, 2005).

e. *Sensitivitas*

Perubahan output sensor ( $\Delta O$ ) untuk setiap perubahan input sensor ( $\Delta I$ ), yang dinyatakan dalam rasio ( $\Delta O / \Delta I$ ) (Bentley, 2005).

f. Histeresis

Perubahan nilai output (O) yang bergantung pada nilai input pengukuran naik dan pengukuran turun (Bentley, 2005).

$$\text{Hysterisis} = O(I)_{I\downarrow} - O(I)_{I\uparrow} \quad (2.21)$$

$$\text{Maximum Hysterisis(\%)} = \frac{\hat{H}}{O_{MAX} - O_{MIN}} \times 100\% \quad (2.22)$$

g. Resolusi

Resolusi merupakan perubahan input (I) terbesar yang dapat terjadi tanpa adanya perubahan output (O) (Bentley, 2005).

h. Presisi

Pengukuran berulang pada kondisi sama yang menghasilkan nilai pengukuran yang sama (ASHREA, 2009). Tingkat presisi dari alat dapat diketahui dari nilai  $Cv$  (*Coefficient of Variation*) dimana :

$$Cv = \frac{\text{Standar Deviasi}}{\text{Nilai Rata-rata}} \times 100\% \quad (2.23)$$

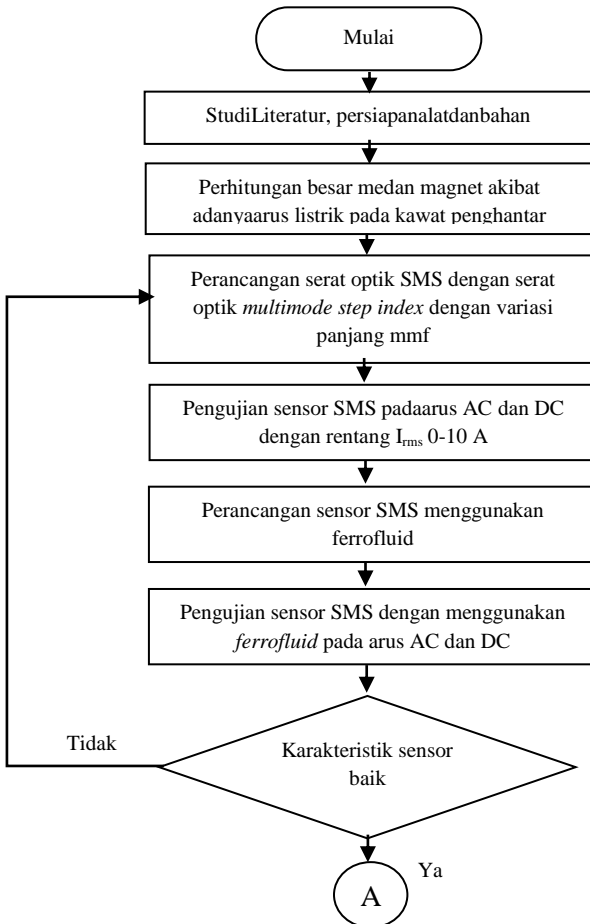
i. Akurasi

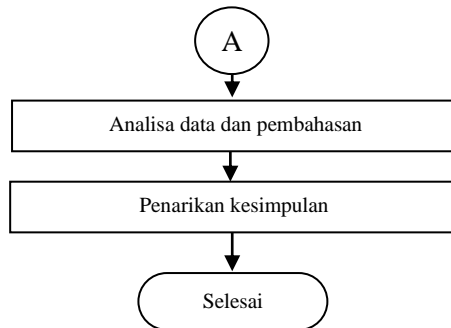
Akurasi merupakan kemampuan sebuah alat ukur untuk menunjukkan kebenaran suatu nilai yang dihasilkan dari pengukuran kuantitatif (ASHREA, 2009)

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan dari awal hingga akhir untuk tercapainya tujuan tugas akhir ini. Berikut Gambar 3.1 alur metodologi yang akan dilakukan:





**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Pengerjaan tugas akhir ini diawali studi literatur. Studi literatur berisi serangkaian kegiatan pencarian dan pengkajian sumber-sumber yang relevan dan terpercaya yang menjadi acuan dalam usulan tugas akhir ini. Literatur yang digunakan antara lain buku dan jurnal yang berkaitan dengan prinsip dasar sensor, serat optik, *multimode interference*, *ferrofluid*, elektromagnetik, sensor dan pengukuran.

### 3.1 Desain Sensor Arus AC berbasis Serat Optik berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid

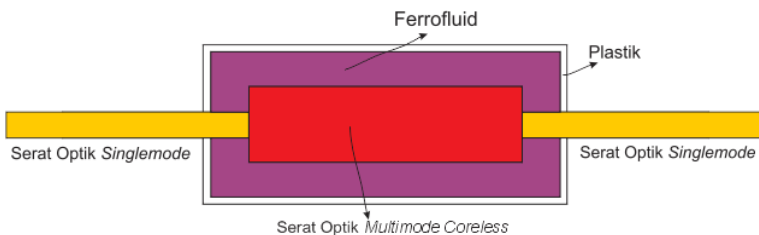
Sensor arus yang akan dirancang diharapkan mampu mengukur arus AC dengan baik dan memiliki sensitivitas, resolusi yang tinggi. Prinsip kerja dari sensor arus AC serat optik SMS ini memanfaatkan perubahan koefisien absorpsi dari Ferrofluid karena pengaruh medan magnet.



**Gambar 3.2** Diagram blok pengukuran arus listrik sensor serat optik SMS menggunakan Ferrofluid

Arus listrik mengalir dari *Power Supply* menuju ke solenoid melalui kawat penghantar. Ketika arus listrik mengalir di dalam solenoid, maka akan timbul medan magnet di dalam solenoid. Pada solenoid, medan magnet yang dihasilkan seragam dan tegak lurus dengan arah arus listrik. Cahaya yang dihasilkan oleh *Optical Light Source* merambat di dalam serat optik *singlemode* dan sensor serat optik SMS dengan Ferrofluid menuju ke

detektor. Cahaya yang merambat didalam sensor serat optik SMS dengan Ferrofluid akan terpengaruh oleh medan magnet yang dihasilkan oleh solenoid. Sensor serat optik SMS dengan ferrofluid diletakkan di dalam solenoid. Adanya medan magnet yang memperngaruhi sensor, indeks bias ferrofluid sensor akan berubah. Perubahan indeks bias sensor akan mengubah nilai koefisien absorpsi dari ferrofluid ditunjukkan oleh persamaan 2.18. Perubahan nilai koefisien absorpsi dari ferrofluid, akan mengubah daya transmisi cahaya yang diterima oleh detektor ditunjukkan oleh persamaan 2.19. Panjang *multimode* dari sensor arus juga mempengaruhi daya transmisi cahaya. Desain dari sensor arus berbasis serat optik SMS menggunakan ferrofluid ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



**Gambar 3.3** Desain sensor arus AC berbasis serat optik SMS menggunakan Ferrofluid

Sensor arus AC dibuat dengan menyambungkan serat optik *multimode coreless* dengan panjang tertentu pada serat optik *singlemode* pada kedua ujung serat optik *multimode*. serat optik berstruktur SMS tersebut dibungkus oleh plastik yang berisikan ferrofluid. Sensor yang akan dirancang memiliki variasi panjang *multimode* 7.65cm, 7.7cm dan 7.85cm. Ferrofluid yang digunakan dibuat dari campuran partikel nano  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan asam oleat. Setelah serat optik *multimode coreless* dibungkus dengan ferrofluid, ujung dari plastik direkatkan pada serat optik *singlemode* menggunakan lem.

### 3.2 Pembuatan Sensor Arus AC berbasis Serat Optik Berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid.

Pada tahap ini, dijelaskan tentang pembuatan serat optik berstruktur SMS menggunakan material ferrofluid. Berikut ini adalah penjelasan pembuatan sensor.

### 3.2.1 Persiapan Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pembuatan serat optik berstruktur SMS di antaranya meliputi:

- a. Serat optik *Singlemode*
- b. Serat Optik *MultimodeCoreless*
- c. *Fusion Splicer* tipe ZIC Sumitomo Electric
- d. *Fiber Cleaver*
- e. *Fiber Stripper*
- f. Alkohol 90%
- g. *Optical Light Source* JDSU tipe OLS 35
- h. *Optical Power Meter* Thorlabs PM-100D
- i. *Photodetector* Thorlabs S154C
- j. *AC Clamp Meter*
- k. *Glue Gun*
- l. Minyak Zaitun
- m. Bubuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- n. *Power Supply* AC
- o. Resistor Geser
- p. *Fiber optic Polarization Controller* (FPC) 030
- q. *Ferrofluid*

### 3.2.2 Penyambungan Sensor Arus Serat optik Berstruktur SMS

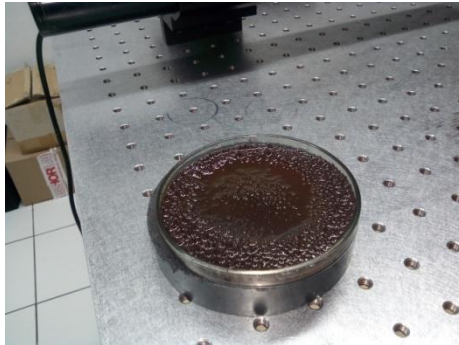
Penyambungan serat optik SMS dilakukan menggunakan *fiber cleaver*, *fiber stripper*, *fiber fusion splicer*, penggaris dan alkohol 90%. Penyambungan dimulai dengan mempersiapkan 2 serat optik *singlemode* dan serat optik *multimode coreless*. Sebelum melakukan pemotongan ujung serat optik, dilakukan pengukuran panjang *multimode* yang akan disambung dengan serat optik *singlemode*. Coating dari ujung serat optik *singlemode* dan *multimode* dikelupas menggunakan *fiber stripper*. Masing-masing ujung



dari serat optik *singlemode* dan *multimode* dipotong menggunakan *fiber cleaver* dan dibersihkan sisa potongan menggunakan tisu dan alkohol 99%. Kedua ujung dari serat optik *multimode* yang telah dipotong, disambungkan dengan serat optik *singlemode* menggunakan *Fiber Fusion Splicer*.

### 3.2.3 Pembuatan Ferrofluid

Pembuatan Ferrofluid dilakukan dengan mencampurkan bubuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan asam oleat. Pada penelitian ini asam oleat yang digunakan adalah minyak zaitun. Masukkan bubuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  kedalam minyak zaitun sebesar 50ml. Campuran antara  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dan minyak zaitun diaduk hingga tercampur dengan merata. Pemisahan antara ferrofluid dengan kelebihan minyak dapat menggunakan magnet.

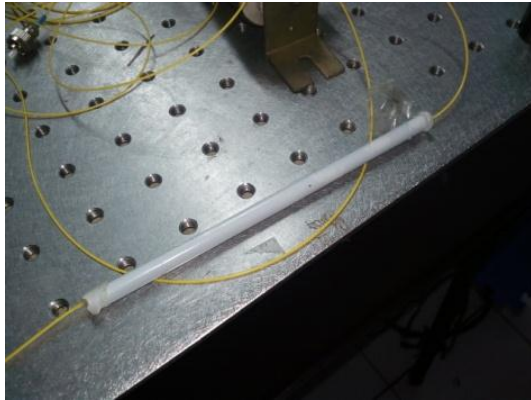


**Gambar 3.4** Perubahan viskositas *ferrofluid* akibat pengaruh medan magnet

### 3.2.4 Pembuatan Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid

Sensor arus serat optik SMS menggunakan ferrofluid dibuat dengan mencampurkan serat optik *multimode coreless* dengan ferrofluid. Bahan yang digunakan untuk membungkus ferrofluid dengan *multimode coreless* adalah plastik. Ujung dari selubung plastik yang berisikan ferrofluid

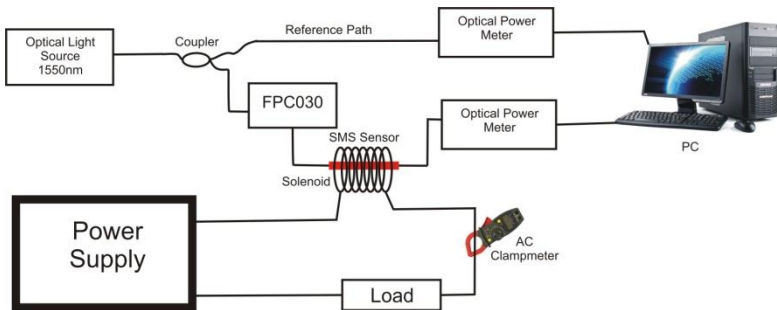
dan serat optik *multimode coreless* direkatkan menggunakan *glue gun*.



**Gambar 3.5** Sensor arus Seratoptik SMS yang telahdibungkusselubung plastik berisi *ferrofluid*

### 3.3 Eksperimen Pengujian Arus Bolak-balikterhadap Sensor Arus Serat Optik SMS

Sensor serat optik SMS diuji pada arus DC dan AC 0-10A dimana listrik yang dihasilkan oleh *Power Supply* dialirkan oleh kawat penghantar menuju ke kawat solenoid kemudian disambungkan ke beban (resistor). Arus listrik yang mengalir pada solenoid menimbulkan medan magnet. Perubahan daya akibat medan magnet dari solenoid diukur menggunakan *Photodetector* dan *Optical Power Meter*. Solenoid yang digunakan pada eksperimen ini memiliki 70 lilitan dengan panjang 10cm dan diameter 1.5cm. *Setup* pengukuran dapat dilihat di Gambar 3.5. Paramater arus yang diukur adalah nilai rms (*root mean square*) dan diukur menggunakan AC *clampmeter*.



**Gambar 3.6** Setup eksperimen

### 3.4 Pengujian arus AC dan DC pada SensorSerat Optik SMS menggunakan Ferrofluid

Pengujian sensor arus DC dan AC berbasis serat optik SMS ini dibagi menjadi 2 yaitu sebelum dan setelah penggunaan ferrofluid sebagai material *cladding*. Pengujian sensor arus serat optik SMS pada arus DC bertujuan untuk mengetahui pengaruh medan magnet akibat arus searah dan bolak balik pada daya keluaran serat optik SMS. Pengujian dilakukan pada rentang arus 0-10A. Sensor serat optik SMS yang diuji memiliki 3 variasi panjang serat optik *multimode* yaitu 7.65cm, 7.7cm, dan 7.85cm. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode *raitometric* yaitu membandingkan daya antara serat optik SMS dengan referensi. Pengukuran ini bertujuan untuk mengurangi fluktuasi daya dari *optical light source*. Pengujian diulang sebanyak 5 kali untuk mendapatkan error dan tingkat presisi dari sensor.

### 3.5 Analisa Karakteristik Statis Sensor Arus AC Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid

Pada tahap ini dilakukan analisa mengenai karakteristik statis dari sensor. Karakteristik statis yang dianalisa yaitu *range*, *span*, resolusi, sensitivitas, linieritas, tingkat presisi dan histerisis dari sensor arus serat optik SMS. Karakteristik statis dari masing-masing pengujian akan dibandingkan yaitu pengujian sebelum dan sesudah penambahan material ferrofluid pada sensor. Setelah melakukan analisa data dan karakteristik sensor, dilakukan

pembahasan pada masing-masing fenomena yang terjadi pada sensor serat optik.

### **3.6 Penarikan kesimpulan**

Penarikan kesimpulan dilakukan setelah menganalisa dan melakukan kajian penelitian tentang karakteristik dari serat optik SMS ,dan penyebab terjadinya rugi daya akibat penggunaan ferrofluid. Penarikan kesimpulan disesuaikan dengan tujuan dari penelitian.

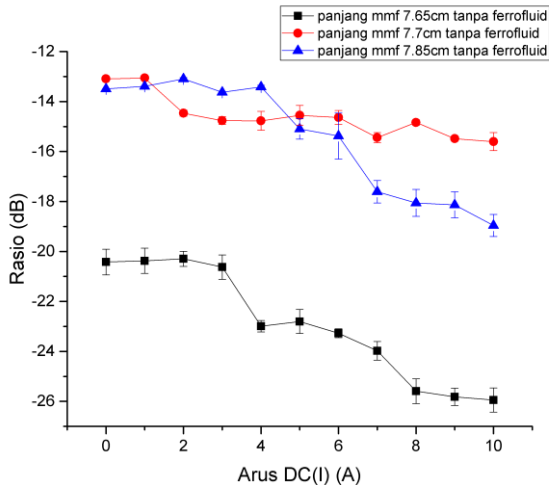
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

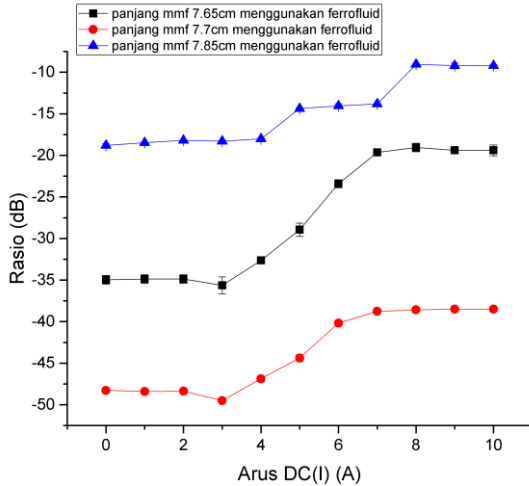
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dari penelitian yang telah dilakukan dan menganalisa pengaruh arus AC terhadap daya transmisi sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid.

#### 4.1 Hasil Uji Sensor Arus AC Berbasis Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid

Pada tahap ini, sensor serat optik SMS diuji pada arus DC dan AC dengan arus 0-10A. Sensor serat optik SMS yang diuji memiliki 3 variasi panjang *multimode* yaitu 7.65cm, 7.7cm, dan 7.85cm. Hasil uji sensor arus serat optik SMS terhadap arus DC dan AC dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2



(a)

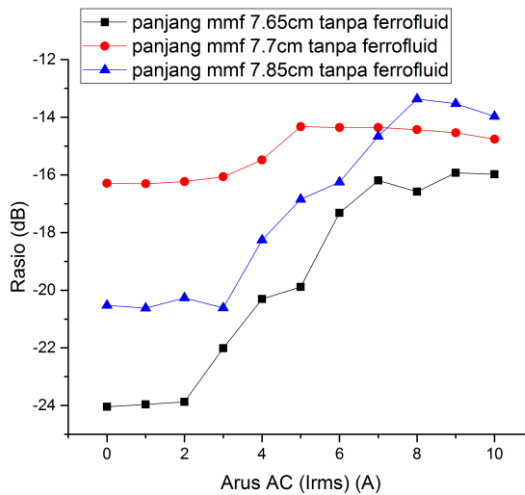


(b)

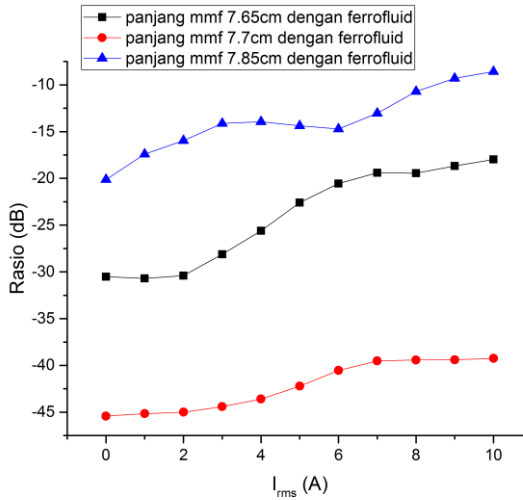
**Gambar 4.1** Hubungan Arus Listrik DC terhadap transmisi daya Sensor serat Optik SMS tanpa ferrofluid(a), dengan ferrofluid(b)

Pada uji sensor serat optik SMS pada arus DC, perubahan transmisi daya paling besar pada rentang arus 3-7A. Pada gambar 4.1 (a) terlihat bahwa transmisi daya mengalami penurunan daya akibat pengaruh dari arus listrik. Arus berubah dari 0-10 A dengan perubahan kerapatan medan magnet 0-0.08792 Tesla. Penurunan transmisi daya pada sensor serat optik SMS disebabkan oleh titik *self imaging* pada serat optik *multimode coreless* menjauh dari sambungan *leadout*. Pengaruh dari perubahan polarisasi cahaya di dalam serat optik akibat medan magnet dapat diamati. Secara tidak langsung perubahan arus dapat diukur. Pada sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid menunjukkan perubahan daya hingga 15dB pada rentang arus yang sama. Perubahan transmisi daya sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid cenderung kecil pada rentang arus 0-3A pada ketika variasi panjang *multimode coreless*. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya mengenai sensor

arus DC menggunakan ferrofluid (Li, Han, & dkk, 2014) dan sensor medan magnet berbasis serat optik SMS dan ferrofluid (Chen Y. , Han, Liu, Lan, & Xiao, 2013) yang memiliki kenaikan transmisi daya linier pada rentang intensitas medan magnet 20-100 Oe dengan slope 0.827, sensor arus serat optik SMS pada penelitian ini memiliki kenaikan transmisi daya pada rentang yang sama. Pada rentang 20-100 Oe, sensor memiliki kenaikan daya linier dikarenakan adanya pengaruh dari ferrofluid. Ferrofluid mengalami saturasi ketika intensitas medan magnet diatas 100 Oe. Pada sensor arus serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang 7.65cm memiliki slope pada rentang arus 3-7A sebesar 4,3 dimana pada rentang tersebut intensitas medan magnet yang dihasilkan adalah 26-70 Oe.



(a)

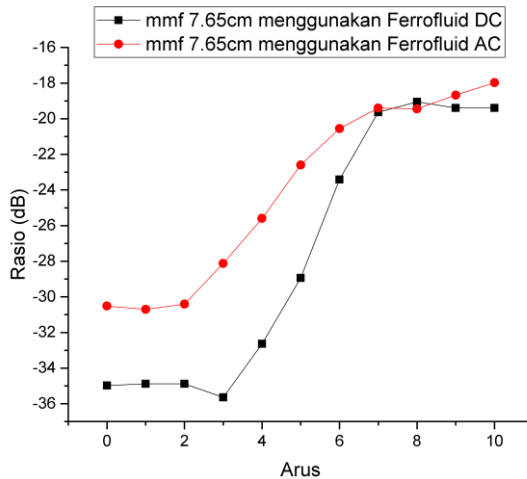


(b)

**Gambar 4.2** Hubungan Arus Listrik AC terhadap transmisi daya Sensor serat Optik SMS tanpa ferrofluid(a), dengan ferrofluid(b)

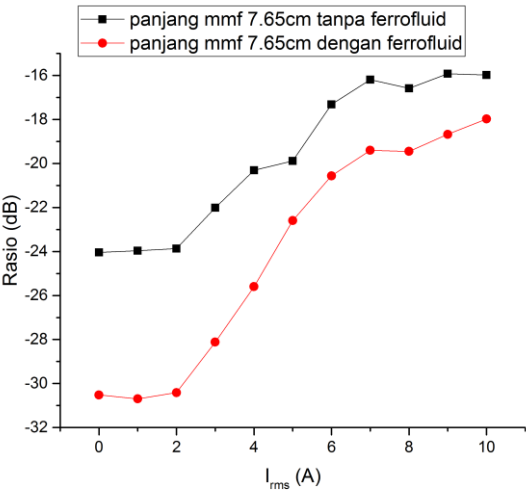
3 variasi panjang *multimode* memiliki perbedaan daya transmisi. Ini disebabkan karena jarak *reimaging* masing-masing sensor berbeda. Dari eksperimen yang telah dilakukan, sensor serat optik SMS dapat mendeteksi perubahan arus AC. Nilai yang dapat diukur oleh sensor adalah *root mean square* dari arus AC. Perubahan daya sensor serat optik SMS menggunakan Ferrofluid terhadap arus AC dan DC menunjukkan kesamaan *trend*.



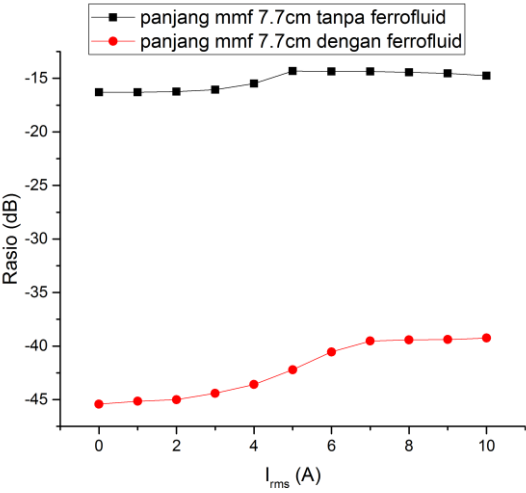


**Gambar 4.3** Hubungan arus listrik DC dan AC terhadap transmisi daya sensor serat optik SMS

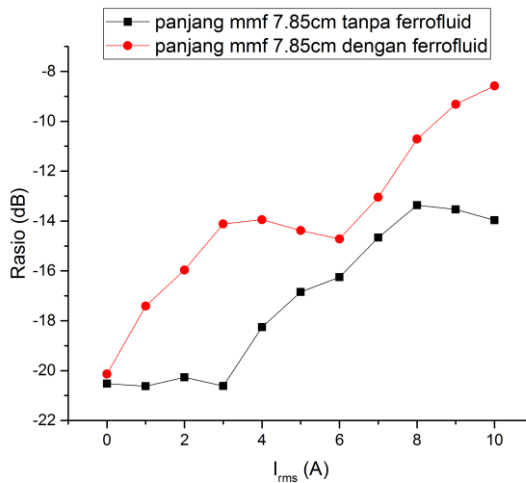
Gambar 4.3 menunjukkan perubahan transmisi daya sensor serat optik SMS menggunakan Ferrofluid terhadap arus DC dan AC. Perubahan transmisi daya sensor serat optik terhadap arus DC lebih besar dari pengaruh terhadap arus AC. Pada arus 7-9 A menunjukkan tranmisi daya yang sama. Arus AC yang terukur oleh sensor serat optik SMS adalah nilai rms. Perbedaan arus AC dan DC adalah frekuensi dari arus. Perubahan AC tidak dapat terbaca oleh sensor serat optik SMS dikarenakan sensor serat optik SMS tidak dapat mendeteksi perubahan arah dari medan magnet akibat arus AC.



(a)



(b)



(b)

**Gambar 4.4** Perbandingan daya keluaran sensor arus serat optik SMS dengan dan tanpa ferrofluid pada panjang 7.65cm (a), 7.7cm (b) dan 7.85cm (c) terhadap arus AC

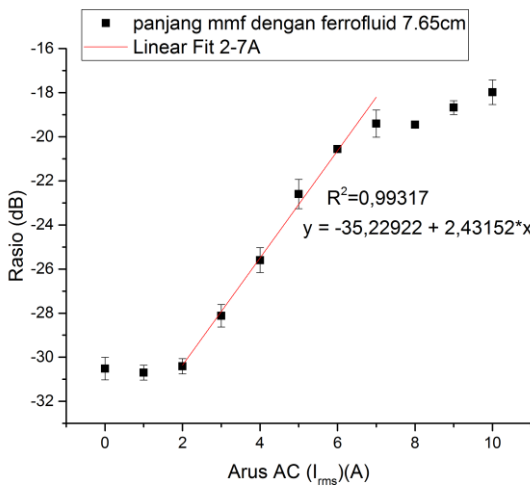
Pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan pengaruh arus listrik AC terhadap daya transmisi cahaya serat optik SMS yang memiliki panjang *multimode* berbeda. Pada Gambar 4.4(a) menunjukkan sensor serat optik SMS dengan panjang *multimode* 7.65cm memiliki kenaikan transmisi daya terhadap arus linier pada rentang 3-7A. Pada Gambar 4.4(b) menunjukkan sensor serat optik SMS dengan panjang *multimode* 7.7cm memiliki kenaikan transmisi daya terhadap arus linier pada rentang 0-7A. Dan pada Gambar 4.4(c) menunjukkan sensor serat optik SMS dengan panjang *multimode* 7.85cm memiliki kenaikan transmisi daya terhadap arus linier pada rentang arus 0-4A dan 6-10A. Sensor serat optik menggunakan ferrofluid memiliki slope yang lebih besar dari sensor serat optik SMS tanpa ferrofluid.

Dari eksperimen menunjukkan bahwa, sensor serat optik SMS memiliki sensitivitas dan span pengukuran yang lebih baik dari sensor serat optik SMS tanpa ferrofluid. Hal ini dikarenakan

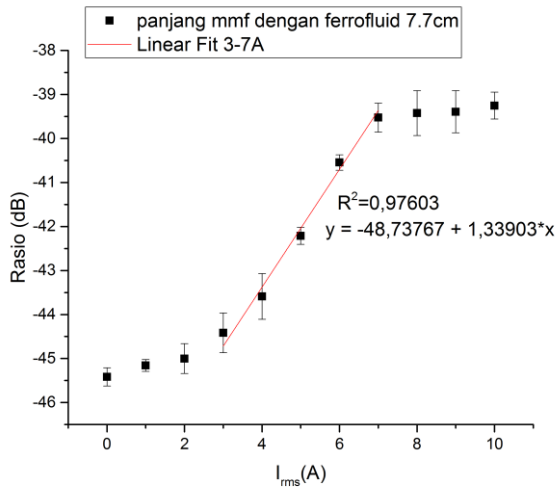
adanya medan *evanescent* yang timbul akibat dari ferrofluid yang membungkus serat optik *multimode*. Koefisien absorpsi medan *evanescent* dari ferrofluid akan berubah sebesar dengan medan magnet disekitar serat optik karena perubahan indeks bias dari ferrofluid. Adanya medan *evanescent* sangat mempengaruhi MMI pada serat optik multimode.

#### 4.2 Analisa Karakteristik Statis Sensor Arus AC Serat Optik Berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid.

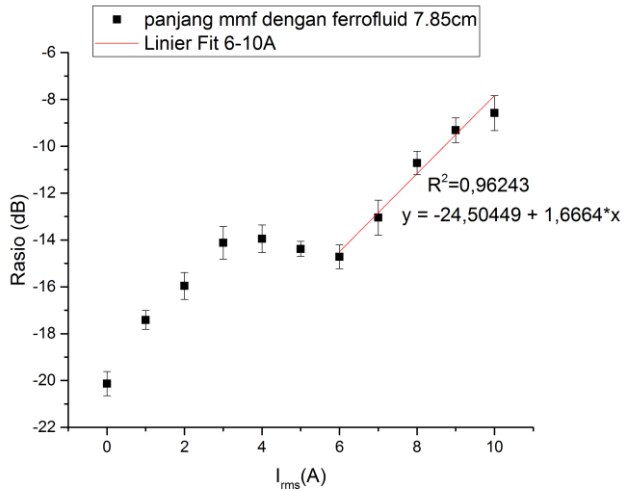
Pada tahap ini, dilakukan analisa karakteristik statis dari respon daya transmisi dari serat optik SMS. Karakteristik statis yang diukur adalah range, span, sensitivitas dan resolusi dari sensor serat arus serat optik SMS.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4.5** Hubungan arus AC terhadap daya transmisi sensor arus AC serat optik SMS menggunakan ferrofluid 1mmf 7.65cm(a), 1mmf 7.7cm(b), dan 1mmf 7.85cm(c).

Pada Gambar 4.5 dapat dilihat, bahwa perubahan daya serat optik SMS dengan panjang *multimode* 7.65cm menggunakan ferrofluid linier terhadap arus pada rentang 2-7A dimana memiliki nilai linieritas 0.99317 dan slope sebesar 2.43152. ini dikarenakan indeks bias ferrofluid memiliki perubahan paling besar pada rentang 2-7A. Pada sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang *multimode* 7.7cm memiliki perubahan daya linier terhadap kenaikan arus AC pada rentang 3-7A. dan Sensor serat optik SMS dengan panjang *multimode* 7.85cm memiliki perubahan daya linier pada rentang 6-10A. Seperti yang telah diungkapkan Lin Li dkk bahwa ferrofluid mengalami saturasi. Pemilihan *surfactant* dari ferrofluid juga mempengaruhi karakteristik dari ferrofluid sendiri. Dari hasil pengujian pada arus AC, berikut karakteristik sensor dengan panjang 7.65cm.

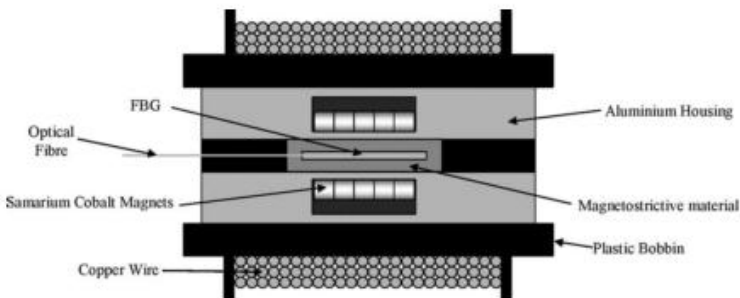
**Tabel 4.1** Karakteristik Statis sensor arus serat optik SMS dengan dan tanpa ferrofluid pada pengujian arus AC dengan 3 variasi panjang

Karakteristik Sensor		Panjang mmf		
		7.65vm	7.7cm	7.85cm
Range	Input (A)	2-7	3-7	6-10
	Output (dB)	-35.639 - -19.631	-45.41 – -39.25	-20.13 – -8.58
Span	Input (A)	5	4	4
	Output (dB)	15,244	6,16342	6,13409
Sensitivitas (dB/A)		3,049	1,540	1,5335225
Resolusi (A)		0,037	0.0735	0.0739
R <sup>2</sup>		0,993	0.976	0.964

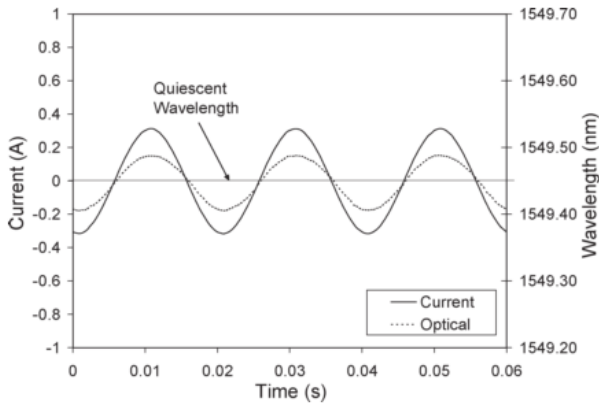
Dari Tabel 4.1 didapatkan bahwa sensor serat optik dengan panjang *multimode* 7.65cm memiliki karakteristik yang paling baik dengan nilai sensitivitas 3.049dB/A dan resolusi 0.037.

Semakin besar nilai sensitivitas dari sensor, maka semakin sensitif sensor untuk mengukur perubahan arus. Semakin kecil nilai resolusi dari sensor, maka semakin kecil nilai yang bisa diukur oleh sensor.

Beberapa sensor arus AC juga telah dikembangkan oleh penelitian sebelumnya salah satunya menggunakan FBG (*Fiber Bragg Grating*) dimana perubahan medan magnet akan mengakibatkan perubahan indeks bias efektif dari sensor (Reilly dkk. 2006). Arus AC diukur secara tidak langsung yaitu menggunakan sebuah *magnetostriuctive material*. Ketika medan magnet mempengaruhi material tersebut, akan terjadi perubahan dimensi dari material yang akan mengubah regangan dari sensor. Metode ini mampu mendeteksi perubahan arus polarisasi positif dan negative dikarenakan ketika material dipengaruhi oleh polarisasi medan magnet negatif, material akan meregang (Nazare & Werneck). Pada penelitian yang telah dilakukan Reilly dkk, sensor arus AC menggunakan FBG ini mampu mengukur arus hingga 1A dari nilai rms hingga *peak-to-peak* dari arus. Ini menunjukkan sensor sangat sensitive untuk mengukur perubahan dari arus (Reilly dkk. 2006).



(a)



(b)

**Gambar 4.6** Desain sensor arus AC FBG fiber (a) Perubahan arus dan panjang gelombang terhadap waktu sensor arus serat optik (Reilly dkk.2006)(b)

Sensor arus FBG ini cukup sensitif untuk mendeteksi perubahan arus hingga 0.1A. berbeda dengan sensor serat optik SMS yang hanya dapat mendeteksi perubahan nilai rms dari ac. Akan tetapi sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid memiliki biaya yang lebih rendah dari sensor arus FBG.

#### 4.3 Uji Presisi Sensor Arus AC berbasis Serat Optik berstruktur SMS menggunakan Ferrofluid.

Telah dilakukan uji perulangan serat optik berstruktur SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang *multimode* 7.65cm terhadap kenaikan arus bolak-balik (AC) pada rentang  $I_{rms}$  0-10A. Uji perulangan dilakukan dengan melakukan pengukuran berulang dari 0-10A sebanyak 5 kali. Berikut adalah hasil uji perulangan dari sensor serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang 7.65cm. dengan menggunakan persamaan 2.31, maka akan didapatkan nilai dari *Coefficient of Variation* dari pengukuran.



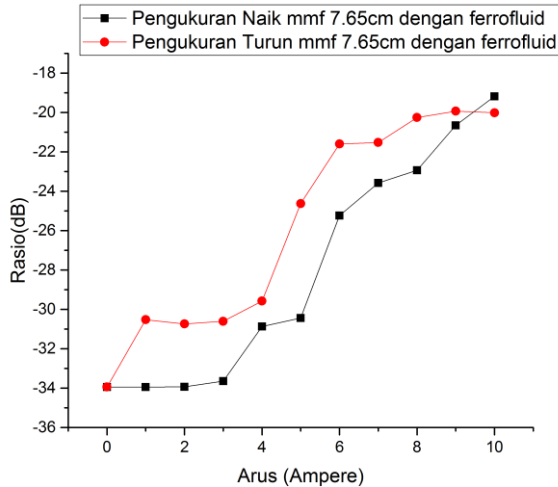
**Tabel 4.2** Hasil Uji presisi Sensor Arus AC Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid dengan panjang mmf 7.65cm

Irms(A)	Rasio(DB)	Std. Deviasi	Cv(%)
0	-30,51684	0,51049	1,673
1	-30,69836	0,34104	1,111
2	-30,41142	0,34471	1,133
3	-28,12028	0,513	1,824
4	-25,59647	0,56515	2,208
5	-22,59755	0,66736	2,953
6	-20,55996	0,15186	0,739
7	-19,40136	0,61443	3,167
8	-19,44878	0,61575	3,166
9	-18,67649	0,31263	1,674
10	-17,97861	0,55567	3,091

Berdasarkan Tabel 4.2, serat optik SMS dengan panjang mmf 7.65cm menggunakan ferrofluid menghasilkan standar deviasi terbesar pada pengukuran arus 5A dengan nilai standar deviasi 0.667. deviasi nilai keluaran dari sensor sangat kecil. Ini dapat dilihat dari nilai koefisien variasi yang kecil yaitu dibawah 5%. Dari pengujian ini menunjukkan tingkat presisi dari sensor adalah 95%.

#### **4.4 Hasil Uji Histerisis Sensor Arus SMS menggunakan Ferrofluid dengan panjang *multimode* 7.65cm**

Pada tahap ini dilakukan pengukuran naik dan turun sensor untuk mengukur histerisis maksimum dari sensor. Pengukuran arus naik dilakukan dari arus AC 0 hingga 10A, kemudian pengukuran turun dari 10-0A. Nilai histerisis ditentukan dengan menghitung selisih pengukuran naik dan turun seperti pada persamaan 2.30 dan nilai maksimum histerisis dihitung menggunakan persamaan 2.31. Berikut adalah hasil pengujian histerisis sensor arus serat optik menggunakan ferrofluid dengan panjang 7.65cm

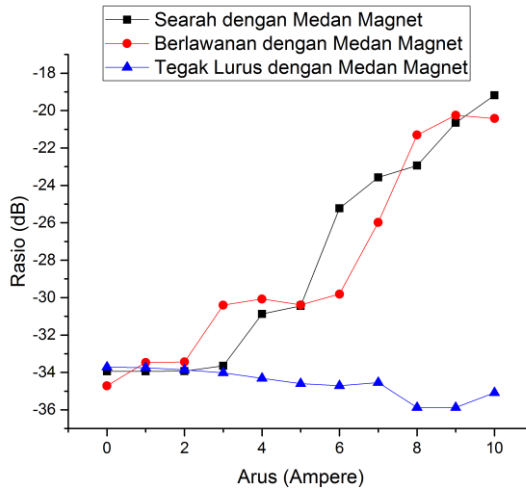


**Gambar 4.7** Histerisis sensor arus serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang mmf 7.65cm

Pengujian histerisis dilakukan dengan mengukur arus terhadap daya keluaran serat optik sebanyak 3 kali pengukuran naik dan turun. Dari grafik pada Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan daya keluaran serat optik pada arus yang sama. Dari pengujian sensor naik dan turun, didapatkan nilai maksimum histerisis dari sensor adalah 39.4% pada arus 5A dengan nilai histerisis sebesar 5.82.

#### 4.5 Hasil Uji Pengaruh Arah Medan Magnet terhadap Daya Keluaran Sensor

Uji pengaruh arah medan magnet terhadap daya transmisi sensor dilakukan untuk melihat pengaruh medan magnet terhadap ferrofluid dan daya keluaran serat optik. Pengujian dilakukan pada 3 posisi yang berbeda yaitu searah dengan cahaya ke detektor, berlawanan dengan cahaya ke detektor, tegak lurus dengan sensor.



**Gambar 4.8** Uji Pengaruh arah medan magnet terhadap daya keluaran Sensor arus serat optik SMS menggunakan ferrofluid dengan panjang *multimode* 7.65cm

Dari grafik diatas tampak bahwa pengaruh medan magnet yang dihasilkan solenoid menunjukkan kesamaan *trend output* pada sensor yang diletakkan searah dan berlawanan dengan medan magnet. Ini disebabkan oleh semua bagian *sensing element* dipengaruhi oleh medan magnet dan arus yang mengalir pada kawat penghantar adalah arus AC. Sedangkan pada sensor yang diletakkan tegak lurus dengan arah medan, hanya sebagian dari sensor saja yang dipengaruhi oleh medan magnet dimana diameter dari solenoid adalah 2cm.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil yang telah diperoleh serta meninjau kembali permasalahan, batasan masalah dan tujuan dari tugas akhir ini, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan yaitu :

- a. Telah dilakukan perancangan sensor arus listrik bolak-balik (AC) berbasis serat optik SMS menggunakan ferrofluid pada rentang arus 0-10A secara eksperimen.
- b. Telah digunakan 3 variasi panjang serat optik *multimode step index* untuk pembuatan sensor arus serat optik yaitu 7.65cm, 7.7cm dan 7.85cm.
- c. Serat optik berstruktur SMS dengan panjang *multimode* 7.65 cm memiliki rentang pengukuran arus AC( $I_{rms}$ ) antara 0-10A dengan nilai span 5A. sensor tersebut memiliki sensitivitas 3.049 dB/A, resolusi 0.019A, maksimum histerisis 39.4%, dan memiliki tingkat presisi 95%. Persamaan linieritas yang diperoleh adalah rugi daya =  $-35.22922 + 2.43152I$  pada arus 2-7A.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan terkait pengembangan penelitian ini adalah :

- a. Dilakukan penelitian sensor serat optik SMS dengan *surfactant* ferrofluid yang berbeda untuk memperoleh hasil pengukuran yang maksimal.
- b. Untuk mendeteksi nilai *peak to peak* dan frekuensi dari arus AC diperlukan metode lain seperti menggunakan *magnetostrictive* material yang dapat mendeteksi perubahan arah medan magnet.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## DAFTAR PUSTAKA

- ABB. (2013). 362-550kV Disconnecting Circuit Breaker(DCB) with FOCS Small, Smart, Flexible. Dalam *ABB Information*. Switzerland: ABB Switzerland Ltd.
- ABB. (2011). FOCS- Fiber Optics Current Sensor Make Light Work. Switzerland: ABB Switzerland Ltd.
- ASHREA. (2009). *Principle of Measurement Systems 3rd*. USA.
- Bahtiar, A. (2008). *Rekayasa Optis*. Bandung: Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjajaran.
- Bentley, j. P. (2005). *Principles of Measurement Systems 4th Edition*. London: Prentice Hall.
- Chen, Y., Han, Q., & dkk. (2016). Magnetic Field Sensor Based on Ferrofluid and Photonic Crystal Fiber with Offset Fusion Splicing. *IEEE Photonics Technology Letters* , 28.
- Chen, Y., Han, Q., Liu, T., Lan, X., & Xiao, H. (2013). Optical Fiber Magnetic Field Sensor Based On Singlemode-Multimode-Singlemode Structure and Magnetic Field. *Optics Letters* , 3999.
- Doucot, B., & Pasquier, V. (2004). Physics in a Strong Magnetic Field. *Seminaire Poincare 2* .
- Floyd, T. L. (2004). Introduction to Alternating Current, Voltage, and Power. Dalam *Electronics Fundamental*. New Jersey: Pearson Education .Inc.
- Gerd, K. (1991). *Optical Fiber Communication* (Vol. 149). Singapore: McGraw-Hill Book.
- Hatta, A. M. (2009). Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures fo Optical Sensing . *Electronic and Communications Engineering, Faculty of Engineering, Dublin Institute of Technology* .

- Hatta, A. M. (2009). *Singlemode-Multimode-Singlemode Optical Fibre Structures for Optical Sensing*. Dublin: Electronic and Communications Engineering, Faculty of Engineering, Dublin Institute of Technology.
- Hatta, A. M., Rajan, G., & dkk. Singlemode-Multimode-Singlemode Fibre Structure for Temperature Measurement Using A Simple Intensity-Based Interrogation System . *Electronic Letters of IEEEExplore* , 45 (21).
- Hect, E. (2002). The Faraday Effect. Dalam *OPTICS* (hal. 366-368). San Francisco: Addison Wesley.
- Kao, P. S. (2009). Fiber Optic. Dalam *Fundamental of Photonics*. New York: Jhon Wiley & Sons, Incoorporation.
- Kumar, A., Varshney, & Sharma, P. (2003). Transmission Characteristics of SMS Fiber Optic. *Optics Communications* , 219, 215-219.
- Li, L., Han, Q., & dkk. (2014). An All-Fiber Optic Current Sensor Based on Ferrofluids and Multimode Interference. *International Journal of Food Science & Technology* , 14.
- Makarious, A. H., & Farrell, P. G. (1980). CURRENT SENSING WITH METAL-COATED MULTIMODE OPTICAL FIBERS. *ELECTRONICS LETTERS* .
- Martins, R. D. (t.thn.). *Resistance to the Discovery of Electromagnetism : Oersted and the Symmetry of the Magnetic Field*. Dipetik January 27, 2017
- Minkner, R., & Schmid, J. (1999). A NEW FLEXIBLE FIBER OPTIC CURRENT-MEASURING-SYSTEM FOR AC- AND DC-CURRENT IN HIGH VOLTAGE SYSTEM. *High Voltage Engineering Symposium, Conference Publication IEE* . IEEE.
- Nazare, F. V., & Werneck, M. M. (t.thn.). Efficient Magnetic Biasing Scheme for a Bragg-Gratting-Based Magnetostrictive Alternating Current Sensor.



- Reilly, D., Willshire, A. J., Fusiek, G., Niewczas, P., & McDonald, J. R. (2006). A Fiber-Bragg-Grating-Based Sensor for Simultaneous AC Current and Temperature Measurement. *IEEE Sensors Journal* , 1539.
- Respita, K. S., & dkk. (2007). Efek Magnetopstis pada Lapisan. *Laboratorium Rekayasa Optis Universitas Diponegoro* .
- Ruddy, V., MacCraith, B., & Murphy, J. (1990). Evanescent wave spectroscopy using multimode fibers. *J. Appl. Phys* , 6070-6074.
- Scherer, C., & Neto, A. M. (2005). Ferrofluids : Properties and Applications. *Brazilian Journal of Physics* , 35, 1.
- Sidik, P. (2009). Medan Magnet di Sekitar Penghantar Berarus Listrik.
- Sujatnoko, H. (2013, Agustus 31). Riwayat Michael Faraday. *Jurusan Kimit ITB, Bandung* .
- Suryawan, D. W., Sudjadi, & Karnoto. (2007). RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING TEGANGAN, ARUS DAN TEMPERATUR PADA SISTEM PENCATU DAYA LISTRIK DI TEKNIK ELEKTRO BERBASIS MIROKONTROLER ATMEGA 128.
- Tonks, M. J. (2006). Modeling and Testing of Fast Response, Fiber-Optic Temperature Sensors. *Dessertation of Virginia Polytechnic Institute and State University. Aerospace Engineering* .
- Wang, Q., & G.Farell. (2006). All-fiber multimode interference-based refractometer sensor. *Opt.Lett* , 317-319.
- Wiley, J. (1991). *Fundamental of Photonics*. USA.
- Zahn, M. (2001). Magnetic fluid and nanoparticle applications to nanotechnology. *Journal of Nanoparticle Research* , 3, 2.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## LAMPIRAN A SPESIFIKASI ALAT

### A.1 3-Paddle Polarization Controllers



**Gambar 1.**3-Paddle Fiber Polarization Controllers

**Tabel 1.**Spesifikasi 3-Paddle Fiber Polarization Controllers

Item #	FPC030	FPC031	FPC032
Paddle Material	Black Delrin		
Number of Paddles	3		
Loop Diameter	1.06" (27 mm)		
Paddle Rotation	$\pm 117.5^\circ$		
Foot Print (L x W)	8.5" x 1.0" (215.9 mm x 25.4 mm)		
Fiber	None	CCC1310-J9	
Operating Wavelength Range <sup>a</sup>	N/A	1260 - 1625 nm	
Design Wavelength <sup>b</sup>	N/A	1310 nm	
Mode Field Diameter	N/A	8.6 $\pm$ 0.4 $\mu$ m @ 1310 nm 9.7 $\pm$ 0.5 $\mu$ m @ 1550 nm	
Cladding Diameter	N/A	125 $\pm$ 0.7 $\mu$ m	
Coating Diameter	N/A	242 $\pm$ 5 $\mu$ m	
Tubing Diameter	N/A	$\varnothing$ 900 $\mu$ m Tight Buffer	
Numerical Aperture	N/A	0.14	
Loop Configuration <sup>c</sup>	N/A	2-3-2	
Connectors	N/A	FC/PC	FC/APC
Bend Loss	N/A	$\leq 0.1$ dB	

# **A-2 Fiber Power Head with InGaAs Detector S154C** **Thorlabs**



**Gambar 2. Fiber Power Detector S154C Thorlabs**

**Tabel 2.TabelSpesifikasiPhotodetector S154C Thorlabs**

S154C	
Detector Type	InGaAs Photodiode
Wavelength Range	800 - 1700 nm
Optical Power Working Range	100 pW - 3 mW (-70 dBm ... +5 dBm)
Max Average Power Density	100 mW/cm <sup>2</sup>
Max Pulse Energy	20 µJ
Linearity	± 0.5%
Resolution <sup>1)</sup>	10 pW (-80 dBm)
Measurement Uncertainty <sup>2)</sup>	±5%
Typical Application	Low Power Fiber Lasers
Laser Types	Fiber coupled Diode, He-Cd, Arlo, Krlo, Dye, Ti-Sapphire
Coating /Diffuser	N/A
Cooling	Convection
Head Temperature Measurement <sup>3)</sup>	NTC Thermistor 3 kΩ
Console Compatibility	PM100D, PM100A, PM100USB, PM200, PM320E
Response Time	< 1 µs
Sensor Dimensions	36.2 x 31 x 14.5 mm (w/o fiber adapter)
Active Detector Area	Ø2 mm
Input Aperture	Ø5 mm
Connector	Sub-D 9p male
Weight	0.03 kg
Aperture Thread	SM05, outer thread
Fiber Adapters (optional)	SC, LC, ST, SMA (FC included)

<sup>1)</sup> Measured with PM100D console in bandwidth low setting.  
<sup>2)</sup> Beam diameter > 1mm  
<sup>3)</sup> This specification is valid for S154C devices from serial number 1203xxx. For older versions, please contact technical support.



## LAMPIRAN B DATA EKSPERIMEN

### B-1. Data Pengujian Sensor Serat Optik SMS Setelah dan Sebelum menggunakan Ferrofluid terhadap Arus AC

**Tabel 3.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus AC (lmmf 7.65cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-24,04202	0,08712
1	-23,96003	0,04831
2	-23,87263	0,13368
3	-22,00802	0,18379
4	-20,30577	0,33565
5	-19,88171	0,21508
6	-17,31997	0,1391
7	-16,19457	0,40921
8	-16,58528	0,29905
9	-15,92434	0,01626
10	-15,97508	0,00245

**Tabel 4.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus AC (lmmf 7.7cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-16,29013	0,00281
1	-16,30748	0,00393
2	-16,22963	0,01701
3	-16,06558	0,09641
4	-15,47813	0,06613
5	-14,32374	0,04686
6	-14,35943	0,04378

7	-14,35575	0,01749
8	-14,43178	0,02588
9	-14,53835	0,02817
10	-14,75801	0,03352

**Tabel 5.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus AC (lmmf 7.85cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-20,52381	0,08692
1	-20,62037	0,29174
2	-20,26967	0,14313
3	-20,61541	0,04973
4	-18,257	0,55716
5	-16,84617	0,78979
6	-16,24791	1,8169
7	-14,66433	0,22616
8	-13,36607	0,14414
9	-13,53176	0,12379
10	-13,96928	0,05173

**Tabel 6.** Pengujian Sensor SMS menggunakanFerrofluid terhadap Arus AC (lmmf 7.65cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-30,51684	0,01049
1	-30,69836	0,04104
2	-30,41142	0,03447
3	-28,12028	0,0513
4	-25,59647	0,06515
5	-22,59755	0,66736

6	-20,55996	0,01519
7	-19,40136	0,00614
8	-19,44878	0,01157
9	-18,67649	0,03126
10	-17,97861	0,05557

**Tabel 7.** Pengujian Sensor SMS menggunakan Ferrofluid terhadap Arus AC (Immf 7.7cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-45,41726	0,03072
1	-45,15673	0,01331
2	-45,0007	0,03412
3	-44,4135	0,07452
4	-43,5895	0,11929
5	-42,21176	0,19513
6	-40,54448	0,17494
7	-39,52574	0,02995
8	-39,42317	0,01049
9	-39,39163	0,00479
10	-39,25384	0,03056

**Tabel 8.** Pengujian Sensor SMS menggunakan Ferrofluid terhadap Arus AC (Immf 7.85cm)

Arus (Irms)(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-20,13048	0,05142
1	-17,41227	0,04011
2	-15,96237	0,05777
3	-14,11709	0,06966
4	-13,94436	0,15882
5	-14,37928	0,32158



6	-14,71654	0,50789
7	-13,04679	0,74425
8	-10,71207	0,19839
9	-9,31614	0,13307
10	-8,58245	0,07446

## **B-2. Data Pengujian Sensor Serat Optik SMS Setelah dan Sebelum menggunakan Ferrofluid terhadap Arus DC**

**Tabel 8.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus DC (Immf 7.65cm)

Arus(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-20,42031	0,51427
1	-20,37425	0,50409
2	-20,29366	0,30317
3	-20,62388	0,48868
4	-22,99169	0,22885
5	-22,80031	0,47766
6	-23,27317	0,18032
7	-23,97776	0,37475
8	-25,59155	0,49773
9	-25,81598	0,34615
10	-25,94272	0,48452

**Tabel 9.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus DC (Immf 7.7cm)

Arus(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-13,09223	0,02671
1	-13,05645	0,03457

2	-14,46552	0,12064
3	-14,76382	0,1574
4	-14,77223	0,37647
5	-14,5529	0,39478
6	-14,63654	0,28126
7	-15,44403	0,20612
8	-14,83715	0,10254
9	-15,48655	0,05372
10	-15,60333	0,35949

**Tabel 10.** Pengujian Sensor SMS tanpa Ferrofluid terhadap Arus DC (lmmf 7.85cm)

Arus(A)	Rasio (dB)	Standar Deviasi
0	-13,49362	0,00772
1	-13,39177	0,02095
2	-13,08929	0,04563
3	-13,62749	0,02448
4	-13,41625	0,06486
5	-15,09361	0,4075
6	-15,37929	0,92107
7	-17,60931	0,44616
8	-18,05618	0,53891
9	-18,13151	0,51898
10	-18,96166	0,4409

**Tabel 11.** Pengujian Sensor SMS menggunakan Ferrofluid terhadap Arus DC (lmmf 7.65cm)

Arus(A)	Rasio(dB)	Deviasi
0	-34,9762	0,53519
1	-34,88038	0,51271
2	-34,87572	0,50828
3	-35,6392	1,02177
4	-32,63632	0,35023
5	-28,93813	0,80182
6	-23,41829	0,48553
7	-19,63139	0,38324
8	-19,05399	0,50727
9	-19,39185	0,4042
10	-19,39185	0,65452

**Tabel 12.** Pengujian Sensor SMS menggunakan Ferrofluid terhadap Arus DC (lmmf 7.65cm)

Arus(A)	Rasio(dB)	Deviasi
0	-48,26658	0,02478
1	-48,39709	0,02261
2	-48,36486	0,01571
3	-49,50071	0,01717
4	-46,8745	0,34955
5	-44,37428	0,42126
6	-40,1703	0,13765
7	-38,76418	0,1425
8	-38,58137	0,03636
9	-38,48757	0,00989
10	-38,48757	0,00489

**Tabel 13.** Pengujian Sensor SMS menggunakan Ferrofluid terhadap Arus DC (Immf 7.65cm)

Arus(A)	Rasio(dB)	Deviasi
0	-18,79005	0,21032
1	-18,46029	0,03379
2	-18,18466	0,03538
3	-18,2968	0,01602
4	-18,02398	0,09237
5	-14,35734	0,07844
6	-14,05116	0,26221
7	-13,8098	0,04865
8	-9,04012	0,06632
9	-9,21232	0,36472
10	-9,21232	0,12757

### **B-3. Data Pengujian Histerisis Sensor Serat Optik SMS menggunakan Ferrofluid (Immf 7.65cm)**

**Tabel 11.** Data Pengujian Histerisis

Arus	Pengukuran naik	Pengukuran Turun	histerisis
1	-33,94159	-30,51975	3,42184
2	-33,9334	-30,73551	3,19789
3	-33,64472	-30,60205	3,04267
4	-30,86954	-29,5764	1,29314
5	-30,44312	-24,6223	5,82082
6	-25,22928	-21,59463	3,63465
7	-23,57717	-21,51908	2,05809
8	-22,93712	-20,25505	2,68207
9	-20,65438	-19,93166	0,72272

10	-19,17978	-20,01106	- 0,83128
----	-----------	-----------	--------------

$$Histerisis(\%) = \frac{5,82082}{-19,17978 - -33,94159} \times 100\% = 39,43161442\%$$

#### B-4. Data Pengujian Variasi Arah Medan Magnet (Immf 7.65cm)

**Tabel 12.** Data Pengujian Variasi Arah Medan Magnet

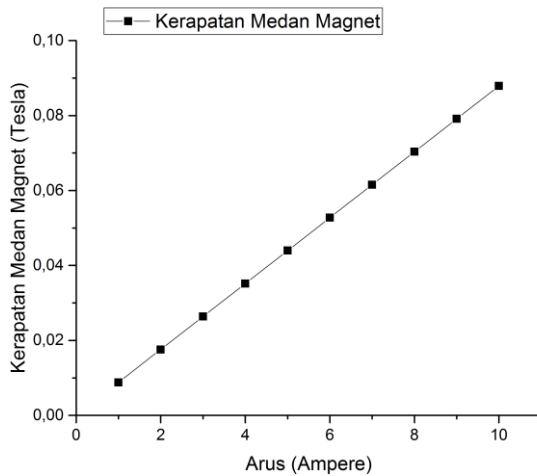
Arus (Irms)	Searah	Berlawanan	Tegak Lurus
0	-33,94095	-34,71139	-33,71139
1	-33,94159	-33,46943	-33,74408
2	-33,9334	-33,44253	-33,85786
3	-33,64472	-30,40054	-34,02429
4	-30,86954	-30,07235	-34,3133
5	-30,44312	-30,39135	-34,59708
6	-25,22928	-29,81492	-34,70557
7	-23,57717	-25,97587	-34,54559
8	-22,93712	-21,30913	-35,8728
9	-20,65438	-20,24861	-35,87547
10	-19,17978	-20,42502	-35,08652

#### B-5. Data Kerapatan Medan Magnet pada Arus 0-10A.

**Tabel 13** Kerapatan Medan Magnet pada arus 0-10A

Arus(Ampere)	Kerapatan Medan Magnet(B)(Tesla)
1	0,008792
2	0,017584

3	0,026376
4	0,035168
5	0,04396
6	0,052752
7	0,061544
8	0,070336
9	0,079128
10	0,08792



**Gambar 3.** Plot kerapatan medan magnet terhadap arus

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BIOGRAFI PENULIS



**Hadrian Hogantara Saputra**-lahir di Surabaya, 16 Mei 1995. Penulis merupakan anak pertama dari Sih Muhardi dan Kunarti. Penulis memulai pendidikan di SDN Tembok Dukuh III Kecamatan Bubutan Surabaya pada tahun 2001 hingga 2007. Penulis melanjutkan sekolah di SMPN 6 Surabaya pada tahun 2007-2010. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan ke sekolah menengah atas di SMAN 2 Surabaya pada tahun 2010 hingga 2013. Setelah lulus dari sekolah menengah atas pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan di Teknik Fisika pada tahun yang sama. Saat berstatus mahasiswa, penulis aktif dalam kepengurusan HMTF ITS 14/15 dan HMTF ITS 15/16. Penulis juga aktif sebagai Asisten Laboratorium Rekayasa Fotonika dan SPIE ITS Student Chapter Member. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT.PJB UBJO&M PLTU Rembang pada tahun 2016. Penulis dapat dihubungi melalui 089677222822 atau email [hadrian13@mhs.ep.its.ac.id](mailto:hadrian13@mhs.ep.its.ac.id).